William R. Ashby

Proyecto para un cerebro

ESTRUCTURA Y FUNCION

EDITORIAL TECNOS, S. A. MADRID

PROYECTO PARA UN CEREBRO

Esta obra se basa en el hecho de que el sistema nervioso se comporte adaptativamente y en la hipótesis de que esencialmente consiste en mecanismos, y parte del supuesto de que estos dos datos no son irreconciliables, pues pretende deducir de los hechos observados qué tipo de mecanismo debe ser uno que actúe de una manera tan distinta a como lo hacen las máquinas ordinarias.

La obra comienza elaborando una lógica de meconismos rigurosa, que se apoya en conceptos tales como los de sistema dinámico, estabilidad y homeóstasis, y pasa después a aplicarlo al comportamiento de los seres vivos, haciendo ver de este modo que ciertos tipos de comportamiento tienen que ser causados, necesariamente, por ciertos tipos de mecanismos, que representarán las propiedades que es menester que posea el sistema nervioso para que pueda regir tales comportamientos.

Desde que se publicó la primera edición inglesa, en 1952, nuestra comprensión de los mecanismos análogos al cerebro ha aumentodo inmensamente y por ello el autor, al pre-

ESTRUCTURA Y FUNCION

EL PORVENIR ACTUAL DE LA CIENCIA

COLECCION DIRIGIDA POR

ENRIQUE TIERNO GALVAN

VOLUMENES PUBLICADOS

Núm. 1 *Quentin Gibson.*—LA LOGICA DE LA INVESTIGACION SOCIAL (2.ª edición)

» 2 *Ashley Montagu.*—LA DIRECCION DEL DESARROLLO HUMANO

» 3 *Gustav Bergmann.*—FILOSOFIA DE LA CIENCIA

» 4 *Christian Bay.*—LA ESTRUCTURA DE LA LIBERTAD

» 5 *Ernest Nagel.*—LA LOGICA SIN METAFISICA

» 6 *David Hilber y Wilhelm Ackermann.*—ELEMENTOS DE LOGICA TEORICA

» 7 *Vernon Van Dyke.*—CIENCIA POLITICA: UN ANALISIS FILOSOFICO

» 8 *Karl R. Popper.*—LA LOGICA DE LA INVESTIGACION CIENTIFICA

» 9 *R. M. Martín.*—VERDAD Y DENOTACION

» 10 *Ernest Gellner.*—PALABRAS Y COSAS

» 11 *C. D. Broad.*—EL PENSAMIENTO CIENTIFICO

» 12 *John Hospers.*—LA CONDUCTA HUMANA

» 13 *Arthur Pap.*—TEORIA ANALITICA DEL CONOCIMIENTO

» 14 *T. C. Schelling.*—LA ESTRATEGIA DEL CONFLICTO

» 15 *Richard B. Braithwaite.*—LA EXPLICACION CIENTIFICA

» 16 *Milic Capek.*—EL IMPACTO FILOSOFICO DE LA FISICA CONTEMPORANEA

» 17 *Ross Asbby.*—PROYECTO PARA UN CEREBRO

» 18 *Hans Reichenbach.*—FILOSOFIA MODERNA DE LA CIENCIA

Proyecto para un cerebro

El origen del comportamiento adaptativo

W. ROSS ASHBY

Proyecto para un cerebro

El origen del comportamiento adaptativo

ESTRUCTURA Y FUNCION

EDITORIAL TECNOS, S A. – MADRID.

Los derechos para la versión castellana de la obra

DESIGN FOR A BRAIN

The origin of adaptive behaviour

publicada por *Chapman & Hall Ltd.*, de Londres,
son propiedad de EDITORIAL TECNOS, S. A.

Traducción de la 2.ª edición inglesa (1960)

por

VÍCTOR SÁNCHEZ DE ZAVALA

© EDITORIAL TECNOS, S. A. 1965
Calle de O'Donnell, 27, 1.º izqda. Tel. 2 25 61 92. Madrid (9)

Depósito Legal: M-15.525.—1965.
Número de Registro: 6.631-65.

Tipografía Artística. - Alameda, 12. - Madrid.

Indice

Prefacio 9

Prefacio de la segunda edición 11

CAPITULO 1. *El problema* 13

El comportamiento reflejo y el aprendido. La relación entre las partes. La regulación genética. Restricciones en los conceptos. La conciencia. El problema.

CAPITULO 2. *Los sistemas dinámicos* 27

Variable y sistema. El método operativo. Espacio de fases y campo. Los sistemas naturales. Estrategia para los sistemas complejos.

CAPITULO 3. *El organismo como máquina* 45

La especificación del comportamiento. Organismo y medio. Las variables esenciales.

CAPITULO 4. *La estabilidad* 61

El diagrama de efectos inmediatos. La realimentación. La búsqueda de la meta. Estabilidad y conjunto.

CAPITULO 5. *La adaptación como estabilidad* 77

La homeóstasis. La homeóstasis generalizada. La supervivencia. Estabilidad y coordinación.

CAPITULO 6. *Parámetros* 91

Parámetro y campo. Estímulos. Enlace de sistemas. Parámetros y estabilidad. Equilibrios de parte y todo.

CAPITULO 7. *El sistema ultraestable* 101

Implicaciones de la adaptación. Implicaciones de la realimentación doble. Funciones escalonadas. Sistemas con mecanismos de escalón. El sistema ultraestable.

CAPITULO 8. *El homeóstato* 123

El homeóstato en su aspecto adaptativo. El adiestramiento. Algunos fallos aparentes.

CAPITULO 9. *La ultraestabilidad del organismo* 147

Los mecanismos de escalón en el organismo. ¿Tiene la memoria una base molecular? ¿Son necesarios los mecanismos de escalón? Niveles de realimentación. La regulación del objetivo. Configuración de los genes y ultraestabilidad. Resumen.

CAPITULO 10. *Las situaciones recurrentes* 165

La acumulación de adaptaciones.

CAPITULO 11. *El sistema completamente enlazado* 175

El tiempo de adaptación. La adaptación acumulativa.

CAPITULO 12. *Independencia temporal* 187

La independencia. Efectos de la constancia. Efectos de las estabilidades locales.

CAPITULO 13. *Sistema con estabilidades locales* 201

El acercamiento al equilibrio. La dispersión. La localización en el sistema poliestable.

CAPITULO 14. *Estímulos reiterados y habituación* 217

La habituación. Perturbaciones pequeñas.

CAPITULO 15. *La adaptación en sistemas iterados y seriados* ... 227

Los sistemas iterados. La adaptación en serie.

CAPITULO 16. *La adaptación en el sistema multiestable* 241

El medio abundantemente enlazado. El medio escasamente enlazado. La inhibición retroactiva.

CAPITULO 17. *Las regulaciones auxiliares* 255

La comunicación dentro del cerebro. Las regulaciones auxiliares. Distribución de la realimentación.

CAPITULO 18. *Cómo se amplifica la adaptación* 269

La selección en el sistema determinado por estados. La amplificación de la adaptación. El origen del comportamiento adaptativo.

APENDICE

CAPITULO 19. *El sistema determinado por estados* 279

Lógica de mecanismos. La representación canónica. Transformaciones.

CAPITULO 20. *La estabilidad* 293

La probabilidad de la estabilidad.

CAPITULO 21. *Parámetros* 303

Enlace de sistemas. El sistema determinado por estados.

CAPITULO 22. *Los efectos de la constancia* 313

Sistemas con campos múltiples. El sistema ultraestable. Independencia temporal. Diagramas de efectos.

Referencias bibliográficas 323

Indice analítico 325

Prefacio

Este libro no es un tratado sobre todos los mecanismos cerebrales, sino la solución que propongo a un problema específico: el origen de la capacidad que tiene el sistema nervioso de dar origen a un comportamiento adaptativo, capacidad verdaderamente única. La base de la obra la forman el hecho de que tal sistema se comporte adaptativamente y la hipótesis de que esencialmente consiste en mecanismos (parte del supuesto de que estos dos *datos* no son irreconciliables); e intenta deducir de los hechos observados qué tipo de mecanismo tiene que ser uno que se comporta de manera tan distinta a como lo hacen todas las máquinas hasta ahora construidas. Por lo regular, las soluciones que se han venido proponiendo han dejado abierta la cuestión acerca de si podría haber alguna otra teoría que se ajustase igualmente bien a los hechos; mientras que lo que yo he tratado es de deducir lo necesario: las propiedades que *tiene* que poseer el sistema nervioso para comportarse a la vez de modo mecánico y adaptativamente.

Para que la deducción sea rigurosa es esencial una lógica de mecanismos debidamente desarrollada. Hasta hace poco tiempo los estudios dedicados a ellos se movían casi enteramente apoyándose en alguna realización particular: la mecánica, la electrónica, la neuronal, etc.; pero tales días han pasado: existe actualmente una lógica bien desarrollada de los mecanismos puros, tan rigurosa como la geometría y que parece habrá de desempeñar en nuestra comprensión de los complejos sistemas de la biología el mismo papel fundamental que la geometría desempeña con respecto a la astronomía. Sin el desarrollo de semejante lógica básica no hubiera sido posible la presente obra.

Al final del capítulo XVIII se resumen las conclusiones a que llegamos, pero es probable que sean ininteligibles o que lleven a confusiones si se las toma por sí mismas, pues lo único que pretenden es destacar los puntos claves de la ruta ya recorrida por el lector; no obstante lo cual, pueden ser útiles a medida que avance, en cuanto que le ayuden a separar los rasgos más importantes de los de poca monta.

Por haber experimentado la confusión que tiende a surgir siempre que tratamos de poner en relación unos mecanismos cerebrales con el comportamiento observado, me había fijado de antemano la norma de no aceptar nada que no pudiera enunciarse en forma matemática, ya que solamente con este lenguaje puede uno estar seguro de que al ir adelantando no cambia inconscientemente el significado de los términos, añade supuestos nuevos ni se desliza de ninguna otra manera hacia el reino de la confusión. Esta norma ha demostrado ser cumplible: hemos podido dar definiciones rigurosas satisfactorias de conceptos tales como los de organización, comportamiento, cambio de comportamiento, parte todo, sistema dinámico, coordinación y otros análogos — que son notoriamente alusivos, pero esenciales —, y soldar todos ellos en un todo coherente. Mas el rigor y la coherencia dependían de la forma matemática, cuya lectura no es fácil para todos; sin embargo, como la tesis básica descansa en unos razonamientos que en lo esencial son de sentido común, he podido dividir la exposición en dos partes: la principal (capítulos I a XVIII) es de índole no matemática, y forma un todo completo, en tanto que el Apéndice (capítulos XIX a XXII) contiene las cuestiones matemáticas.

Como es probable que el lector necesite frecuentemente referencias de unas partes a otras, los capítulos están divididos en apartados, que se nombran del modo que indico [con un ejemplo]: 4/5 quiere decir capítulo IV, apartado quinto. En lo que se refiere a las figuras y a las tablas, cada una está numerada dentro de su propio apartado: así, la figura 4/5/2 es la segunda figura del apartado 4/5.

Es un placer para mí tener ocasión de manifestar mi deuda con los administradores de Barnwood House y con el Dr. G. W. T. H. Fleming por su generoso apoyo durante la realización de esta obra, así como con el profesor F. L. Golla y el Dr. W. Grey Walter por gran número de útiles críticas.

Prefacio de la segunda edición

Cuando escribí este libro por primera vez empezaba justamente a conocerse la teoría de la información; desde entonces a ahora ha contribuído en tal medida a mejorar nuestra comprensión de la lógica de los mecanismos, que he dedicado a estos aspectos una exposición independiente, intitulada *Introduction to Cybernetics** (a la que aludo en esta obra con la abreviatura *I. to C.*), y cuyos enfoque y métodos son fundamentales para el presente libro.

La imbricación de uno y otro trabajo es bastante pequeña. *I. to C.* se ocupa de los primeros principios en lo concerniente a las cuestiones de los mecanismos, la comunicación y la regulación, pero no se extiende de modo apreciable sobre las aplicaciones de aquéllos: considera las mecanismos como si funcionaran a base de saltos o escalones discretos y muy pequeños, suposición que permite comprender con gran facilidad sus propiedades lógicas. Si bien basado en los mismos principios, *Proyecto para un cerebro* sólo los menciona en la medida necesaria para aplicarlos al problema particular del origen del comportamiento adaptativo: considera mecanismos que cambien de modo continuo (esto es, cuando los escalones tienden a cero), ya que esta suposición hace más manifiestas sus propiedades prácticas; es una obra completa en sí misma, aunque es posible que *I. to C.* ayude al lector a percatarse de los fundamentos.

Durante los ocho años que han transcurrido entre la preparación de la primera edición y la de la segunda, nuestra comprensión de los mecanismos análogos al cerebro ha aumentado inmensamente; por ello he refundido el libro y he redactado de nuevo enteramente sus dos últimas terceras partes. Me parece que la nueva versión presenta el material

---

* Chapman & Hall — Londres, Nueva York — John Wiley & Sons (2.ª reimpresión, 1958); traducida al checo, español [*Introducción a la cibernética*, Buenos Aires, Nueva Visión, 1960], francés, polaco y ruso.

de una forma por todos conceptos más clara, más sencilla y más pertinente que la anterior.

Desgraciadamente, el cambio de plan ha hecho imposible conservar la numeración antigua de los apartados, de suerte que a este respecto las dos ediciones no se corresponden. De buena gana hubiese evitado esta fuente de confusiones, pero a mi entender era preciso que la claridad y la sencillez tuvieran preferencia sobre cualquier otra consideración.

El problema

1/1. ¿Cómo da origen el cerebro al comportamiento adaptativo? En sus intentos de responder a esta pregunta, los científicos han descubierto dos conjuntos de hechos y han experimentado ciertas dificultades para reconciliarlos entre sí. Por una parte, los fisiólogos han hecho ver, de muchos modos distintos, el gran parecido que el cerebro tiene con una máquina, tanto por depender de reacciones químicas como por descansar en la integridad de las vías anatómicas, y por la precisión y el determinismo con que las partes que lo componen actúan unas sobre otras; por otra, los psicólogos y biólogos han confirmado, de manera plenamente objetiva, la convicción del profano de que el organismo vivo se comporta típicamente de forma intencional y adaptativa. La reconciliación de estas dos características del comportamiento cerebral ha mostrado ser harto difícil, y de ahí que algunos estudiosos hayan llegado a declararlas incompatibles.

Mas no vamos a adoptar aquí tal punto de vista: espero hacer patente que un sistema, pese a ser de naturaleza mecanística, puede dar origen a un comportamiento que sea adaptativo; hacer patente también que la diferencia esencial entre el cerebro y cualquiera de las máquinas hasta ahora construídas reside en que aquél se vale ampliamente de un método que se ha venido utilizando muy poco en las máquinas; asimismo, que mediante tal método podemos hacer que el comportamiento de una máquina sea tan adaptativo como queramos, y, finalmente, que es posible que con él pueda explicarse incluso la adaptatividad humana.

Sin embargo, hemos de examinar primero más de cerca la índole de este problema: en este capítulo comenzaremos a hacerlo, los siguientes servirán para elaborar conceptos más exactos, y cuando podamos ya enunciarlo con precisión no nos encontraremos lejos de resolverlo.

El comportamiento reflejo y el aprendido

1/2. Las actividades del sistema nervioso pueden dividirse de forma más o menos neta en dos tipos — dicotomía que, probablemente, constituye una simplificación excesiva, pero que nos bastará hasta que hayamos desarrollado una técnica más perfilada.

El primer tipo es el comportamiento reflejo: es innato, está determinado genéticamente en sus pormenores, se origina principalmente — en los vertebrados — en la médula espinal y en la base del cerebro, y la experiencia individual no lo modifica en forma apreciable; el segundo es el comportamiento aprendido, que no es innato, no está determinado en sus detalles genéticamente (de lo cual trato más por extenso en 1/9), se debe principalmente a la corteza cerebral y se modifica marcadamente en virtud de las experiencias individuales del organismo.

1/3. No nos hemos de ocupar del primer tipo de comportamiento. Damos por supuesto que todo reflejo es producido por un mecanismo neural cuya naturaleza fisicoquímica da origen inevitablemente al comportamiento característico correspondiente, que cada uno de estos mecanismos se desarrolla guiado por la configuración de los genes del caso y es innato, y que la pauta de comportamiento respectiva suele estar adaptada al medio del animal, ya que la selección natural habrá eliminado desde mucho tiempo atrás todas las variantes no adaptadas. Por ejemplo, suponemos que la compleja actividad de toser se debe a un mecanismo especial del sistema nervioso, innato y desarrollado bajo la acción de la estructura dicha, y que se ha adaptado y perfeccionado por el hecho de que todo animal que sea menos capaz de despejarse la tráquea de obstrucciones tiene menos probabilidades de sobrevivir.

Aun cuando los mecanismos que subyacen a estas actividades reflejas son con frecuencia difíciles de estudiar fisiológicamente, y no obstante conocerse en todos sus detalles bastante pocos, gran número de fisiólogos sostiene que no existe dificultad alguna de principio en tal cuestión. Por ello no nos pararemos más a considerar semejante comportamiento ni dichos mecanismos.

1/4. El asunto que nos ocupa es el del segundo tipo de comportamiento: el que no es innato, sino aprendido. Hay gran abundancia de ejemplos de estas reacciones, y toda selección de ellos que presentemos parecerá indigente; con todo, tengo que exponer a lo que me refiero, aunque no sea más que para ofrecer al crítico un blanco definido al que pueda atacar; así pues, voy a presentar varios ejemplos.

Puede hacerse que un perro elegido al azar para un experimento de respuestas condicionadas reaccione al oír una campana, bien con salivación, bien sin ella; además, una vez que se lo haya adiestrado para que reaccione de una forma, puede adiestrársele, sin grandes dificultades, para que lo haga en forma opuesta. Por consiguiente, la respuesta salivar al sonido de la campana no puede deberse a ningún mecanismo que tenga propiedades ya fijadas.

Es posible enseñar a una rata, escogida aleatoriamente para un experimento de recorrido de laberintos, a que se dirija a la derecha o a la izquierda: basta emplear un laberinto apropiado; sobre ello, tras haber aprendido a torcer hacia un lado puede hacerlo luego a torcer hacia el otro.

Acaso el circo nos proporcione el testimonio más aplastante de que los animales pueden tener un comportamiento que no es posible que sea innato. Una foca mantiene en equilibrio sobre el hocico una pelota durante varios minutos; un oso monta en bicicleta, y otro se desliza sobre patines de ruedas; sería ridículo suponer que estas reacciones se deban a mecanismos a la vez innatos y perfeccionados de modo especial con vistas a tales habilidades.

El hombre mismo nos ofrece, desde luego, la más abundante variedad de reacciones aprendidas; pero daremos un solo ejemplo. Cuando uno mira a través de un microscopio compuesto y ve que el objeto no está centrado, sino a la derecha, lo lleva al centro moviendo el portaobjetos todavía más a la derecha; la relación entre acción muscular y cambio visual consiguiente es la inversa de la usual. El asombro y la torpeza iniciales del estudiante manifiestan que no existe ningún mecanismo neural innato que esté listo para esta relación invertida; sin embargo, en unos pocos días de práctica se desarrolla la coordinación.

Tales ejemplos, y todos los hechos de los cuales éstos constituyen unos casos representativos, muestran que el sistema nervioso es capaz de formar modos de comportamiento no innatos ni especificados en detalle por la estructura de los genes.

1/5. El comportamiento aprendido posee muchas características, pero nos vamos a ocupar sobre todo de una sola: la de que cuando los animales y los niños aprenden no sólo cambia su comportamiento, sino que generalmente lo hace en el sentido de convertirse en mejor. En el capítulo V trataremos del pleno significado de este "mejor", mas en los casos sencillos la ganancia es obvia: "gato escaldado huye del agua

fría" *, de modo que después de esa experiencia no sólo ha cambiado el comportamiento del gato con respecto al agua en ebullición, sino que la nueva conducta *disminuye* el riesgo de escaldarse de nuevo; y en el acto llamaríamos anormal a cualquier gato que utilizase el conocimiento recién adquirido de modo que le cayese encima lo antes posible más agua hirviendo.

Una demostración de que el aprendizaje hace pasar normalmente el comportamiento de una forma menos beneficiosa a otra que lo sea más (esto es, favorecedora de la supervivencia) necesitaría que la dedicásemos mucho más espacio del que disponemos; pero en esta introducción no es menester un estudio exhaustivo: basta aducir casos suficientemente ilustrativos para que el significado se aclare; y con este objeto examinaré uno tras de otro los ejemplos anteriores.

Cuando se establece un reflejo condicionado gracias a la ingestión de alimento o de un ácido, la salivación aumenta en cantidad; cambio que beneficia al animal, ya sea que de este modo se lubrique con normalidad la masticación o que la aportación consiguiente de agua diluya el irritante y lo elimine por lavado. Cuando una rata que se mueve en un laberinto ha modificado su comportamiento de suerte que se dirija directamente hacia el alimento situado en el otro extremo, el nuevo proceder es mejor que el antiguo, puesto que conduce a una satisfacción más rápida del hambre del animalito. El comportamiento de los animales circenses pasa de ser aleatorio a estar de acuerdo con lo prefijado por el "domador", el cual impone castigos y concede recompensas: así disminuyen los castigos o aumentan los premios. En cuanto al hombre, sería preciso debatir extensamente la proposición según la cual al aprender suele mejorar el comportamiento; pero en el ejemplo de los movimientos de los dedos y del microscopio compuesto, el movimiento que se llega a conseguir, que lleva el objeto interesante directamente al centro del campo visual, es sin duda alguna mejor que los anteriores, que no eran congruentes con la intención del microscopista.

Podemos enunciar ahora nuestro problema de la siguiente forma preliminar: ¿qué cambios cerebrales acontecen durante el proceso del aprender, y por qué suele transformarse el comportamiento en uno mejor?; ¿qué tipo de procesos mecanísticos podrían ostentar igual progreso?

1/6. El sistema nervioso está muy bien provisto de medios de actuar: la sangre le aporta glucosa, oxígeno y otros metabolitos, de modo que

---

* El original transcribe el refrán inglés que literalmente dice, "el niño quemado teme el fuego"; y se ha modificado el razonamiento que sigue teniendo en cuenta las diferencias entre uno y otro proverbio. (*N. del T.*)

tiene abundancia de energía libre a su disposición; las células nerviosas que componen el sistema no solamente son, en sí mismas, exquisitamente sensibles, sino que están provistas, en los órganos de los sentidos, de dispositivos cuya sensibilidad es aún mayor; la célula nerviosa permite, gracias a sus ramificaciones, que un solo impulso se convierta en muchos impulsos, cada uno de ellos tan activo como aquel único que dió origen a todos; a las ramificaciones suceden, en estadios repetidos, ulteriores ramificaciones, de suerte que, por pequeño que sea el cambio acaecido en un punto cuadquiera, difícilmente podemos poner límite a la magnitud del cambio o respuesta que pueda seguirse conforme se extiendan los efectos; y, gracias a su mando de los músculos, las células nerviosas pueden despertar la actividad de unas máquinas de enorme energía mecánica. Así pues, el sistema nervioso está dotado de potencialidades de actuar casi ilimitadas. Mas, ¿resuelven ellas nuestro problema? Parece que no; lo que primariamente nos concierne es la pregunta de por qué el comportamiento experimenta una mejora durante el aprender, pregunta a la que no contesta el hecho de que un comportamiento dado pueda pasar a otro de menor o mayor actividad; y los ejemplos presentados en 1/5, una vez estudiados en cuanto a los cambios de energía que pueda haber antes y después del aprendizaje, hacen ver que la cuestión de la cantidad de actividad carece, por lo general, de importancia.

Ocurre, incluso, que los testimonios que se oponen a considerar la mera actividad como suficiente, en cuanto solución, son más fuertes todavía: es frecuente que un aumento del volumen de actividad no sea tanto algo carente de importancia como positivamente dañino. Si se permite que un sistema dinámico entre en acción vigorosamente sin tomar precauciones especiales, tal actividad suele llevar a la destrucción del sistema mismo: puede ponerse en marcha un automóvil con el depósito lleno de gasolina, pero si se lo abandona sin conductor, es probable que, lejos de ser beneficiosa, tal actividad sea causa de la destrucción del automóvil con mucha mayor rapidez que si hubiese permanecido inactivo. En 20/10 trataremos este tema más a fondo; baste advertir aquí que la actividad no coordinada conduce meramente a la destrucción del sistema. Entonces, ¿cómo es posible que el cerebro alcance resultados satisfactorios, si sus potencialidades de actuar lo son en parte de autodestrucción?

La relación entre las partes

1/7. El hecho para nosotros básico es el de que después del proceso de aprendizaje el comportamiento suele estar mejor adaptado que antes. Preguntamos, por tanto, qué propiedad han de tener las neuronas para que su ejercicio dé como resultado una mejora del comportamiento del conjunto del organismo.

Puede sugerirse, en primer lugar, que si las células nerviosas están sanas y son normales como tales unidades biológicas, el todo ha de mostrarse sano y normal. Pero es preciso rechazar semejante sugerencia, por inadecuada: pues frecuentemente el organismo mejora en relación con entidades que no tienen nada que les corresponda en la vida de la neurona. Así, cuando un perro al que se alimenta durante un experimento de reflejos condicionados aprende a salivar, el comportamiento mejora porque la saliva constituye un lubricante para la masticación; pero en la existencia de la neurona, puesto que todo el alimento llega en solución, ni "masticación" ni "lubricante" pueden tener importancia ni significado algunos directos. Asimismo, una rata que haya conseguido aprender en un laberinto ha aprendido a seguir una pauta determinada de movimientos; mas en el aprendizaje han intervenido neuronas firmemente sujetas por una tupida red de fibras de neuroglía, y que no se mueven en toda su vida.

Consideremos, finalmente, un maquinista que acabe de ver una señal luminosa y que tenga la mano puesta en el mando de admisión. Si la luz es roja, la excitación procedente de la retina tiene que transmitirse a través del sistema nervioso de modo que las células del córtex motor envíen impulsos a los músculos cuya actividad haga que se *cierre* la válvula de admisión; si la luz es verde, la excitación de la retina, a través del sistema nervioso, ha de ocasionar que las células de la zona mencionada de la corteza cerebral manden la apertura de la válvula. De modo que es preciso que unas neuronas, que no pueden formarse concepción alguna de "rojo", "verde", "tren", "señal" ni "accidente", lleven a cabo la transmisión y garanticen la seguridad del tren. Con todo, el sistema funciona.

1/8. En el caso del maquinista pudiera ocurrir que exista un mecanismo sencillo tal que una luz roja active una cadena de células nerviosas que conduzca a los músculos que cierren la admisión, mientras que una luz verde active otra cadena que acabe en los que hagan que se abra. En esta forma se transmitiría el color de la señal del modo apropiado a través del sistema nervioso.

La sencillez de esta disposición se debe al hecho de que estamos suponiendo que las dos reacciones emplean dos mecanismos independientes. Esta separación puede muy bien hallarse en las reacciones más simples, pero no basta para explicar lo que ocurre en otras más complicadas: en la mayoría de los casos, las actividades neurales "correctas" e "incorrectas" están igualmente compuestas de excitaciones, de inhibiciones y de otros procesos, todos fisiológicos, pero cuyo carácter de adecuación o corrección *no está determinado por el proceso mismo, sino por las relaciones en que éste se encuentre con otros procesos.*

Esta dependencia que tiene la "adecuación" (de lo que esté ocurriendo en puntos del sistema nervioso muy otros de aquél cuya actividad sea adecuada o no) se pone de manifiesto en cuanto el maquinista haya de ir al otro lado de la cabina: pues si antes la flexión del antebrazo cerraba la válvula, ahora la abrirá; y tendrá que invertirse el emparejamiento antes adecuado de rojo y verde con empujar y tirar. Así pues, ya no puede seguirse llamando "adecuada" ni "inadecuada", en sentido absoluto, la acción local del sistema nervioso, y aquella primera y sencilla solución falla.

Otro ejemplo nos lo proporciona la actividad de la masticación, en cuanto que implica que la lengua y los dientes ejecuten movimientos tales que éstos no muerdan aquélla. En sí mismo, ningún movimiento de la lengua puede considerarse como enteramente indebido o erróneo, puesto que lo que puede ser un mal movimiento cuando los dientes se empiecen a poner en contacto podría estar perfectamente cuando se separen y se lleve la comida hacia ellos. Por consiguiente, no cabe llamar "adecuadas" ni "inadecuadas" las actividades de las neuronas que dirijan el movimiento de la lengua; sólo cabe determinar su carácter de adecuación cuando se las ponga en relación con las de las neuronas que manden los movimientos de la mandíbula (propiedad que pertenece, pues, no a ninguno de ambos grupos por separado, sino a la actividad combinada de los dos).

Estas consideraciones revelan la peculiaridad principal del problema. Cuando el sistema nervioso aprende, su comportamiento mejora; sin embargo, al atender a sus distintas partes vemos que no se puede calificar el valor del comportamiento de una de ellas hasta que no se conozcan los comportamientos de las demás; y el valor de *éstos* no puede conocerse mientras no se conozca cómo se comporta la primera: todas las valoraciones son *condicionales*, pues cada una depende de las otras, y, por tanto, no existe ningún criterio de "mejor" que pueda darse de un modo absoluto, es decir, incondicionalmente. Pero la neurona tiene que hacer algo. ¿Cómo llegan, entonces, a coordinar-

se las actividades de las neuronas de modo que el comportamiento del todo mejore, dado que no hay criterio absoluto alguno que guíe a cada neurona individual?

Exactamente con el mismo problema se enfrenta el proyectista de un cerebro artificial, que quiere que semejante cerebro mecánico tenga un comportamiento adaptativo. ¿Cómo puede especificar las propiedades "adecuadas" para cada parte, si la adecuación no depende del comportamiento de cada una, sino de sus relaciones con las demás? El problema para él es el de coordinar las partes del modo oportuno; el cerebro lo hace automáticamente; ¿qué tipo puede haber de máquina que se *auto*coordine?

Este es nuestro problema. Lo enunciaremos con mayor precisión en 1/17; pero antes de llegar allí tenemos que debatir algunas cuestiones menores.

La regulación genética de la función cerebral

1/9. Al rechazar que los detalles de la función cerebral (en la adaptación: véase 1/4) estén mandados genéticamente, hemos de tener gran cuidado de no rechazar demasiado. Es seguro que la configuración de los genes desempeña *cierto* papel en el desarrollo del comportamiento adaptativo, puesto que las distintas especies animales, que difieren esencialmente sólo en la configuración de genes que les es propia *, ostentan diferencias en su capacidad de desarrollarlo que les son características: los insectos, por ejemplo, tienen típicamente una capacidad de esta índole muy reducida, mientras que el hombre la posee muy grande.

Una dificultad con que tropezamos para dar cuenta de la capacidad del niño recién nacido para adaptarse es la de que la configuración que hace del niño lo que es consta de unos 50.000 genes disponibles para guiar la forma del ser vivo, mientras que su cerebro tiene unos 10.000.000 de neuronas para ser guiadas (y su número de terminales puede ser de 10 a 100 veces mayor). Sin duda, el conjunto de los genes no puede determinar todos los pormenores del conjunto de neuronas; es evidente que dicha configuración determina un número relativamente pequeño de factores, los cuales operan después activamente de suerte que llegue a coordinarse un número muchísimo mayor de neuronas.

---

* Obsérvese que el conocido hecho de que haya una herencia protoplasmática no invalida las consideraciones de este apartado cuando se las toma en un sentido genético general, y no únicamente referidas a los genes localizados en los cromosomas (así los 50.000 citados). (*N. del T.*)

Tal vez sea suficiente por el momento lo dicho acerca del modo en que interviene tal configuración; volveremos sobre ello en 18/6. (También se debate esta cuestión en *I. to C.*, apartado 14/16.)

Restricciones en los conceptos que se empleen

1/10. A lo largo de toda esta obra me adheriré a ciertos supuestos básicos y a ciertos principios de método.

Voy a mantener el punto de vista del biólogo: para él, los hechos más fundamentales son que la tierra tiene más de 2.000.000.000 de años y que la selección natural ha venido cribando incesantemente los organismos vivos; como resultado de ello están sumamente especializados en las artes de la supervivencia, artes entre las que se halla la formación del cerebro. Y trataré siempre en este libro el cerebro simplemente como un órgano que se ha desarrollado en la evolución como *medio especializado de sobrevivir.*

1/11. De conformidad con este enfoque, supondremos que el sistema nervioso (y la materia viva, en general) es esencialmente análogo a toda la demás materia; así pues, no haremos uso de ninguna propiedad ni tendencia "vitales", ni invocaremos ningún *Deus ex machina.* Las solas razones que admitiremos para explicar el comportamiento de cualesquiera partes recurrirán a su propio estado y a las condiciones en que se encuentre su entorno inmediato, de todo lo cual se habrá de deducir, de acuerdo con las leyes ordinarias de la materia, el comportamiento observado.

1/12. Seguimos el método "operativo": así pues, no emplearemos ningún concepto psicológico, a menos que pueda ser mostrado de forma objetiva en sistemas no vivientes; y al utilizarlo consideraremos que se refiere exclusivamente a su forma objetiva. Otra restricción relacionada con ésta es la de que todo concepto que empleemos tiene que ser susceptible de que se lo haga patente objetivamente. En el estudio del hombre se suscitan con ello gigantescas dificultades, que se extienden desde lo práctico a lo metafísico; pero como la mayor parte del trabajo se ocupará del comportamiento observado de animales y de máquinas, rara vez surgirán estas peculiares dificultades.

1/13. No nos valdremos de ninguna explicación teleológica del comportamiento; asumiremos en todos los casos que la máquina o el animal se comportaban de una manera determinada en un momento deter-

minado porque su naturaleza física y química en aquel momento no toleraba otra actuación. No explicaremos jamás el que se haya llevado a cabo una acción diciendo que ello será ventajoso más tarde para el animal; por lo demás, cualquier explicación de esta índole entrañaría, desde luego, una argumentación circular, ya que lo que nos proponemos es explicar el origen del comportamiento que se manifiesta teleológicamente dirigido.

1/14. Supondremos, además (excepto cuando se afirme explícitamente lo contrario), que las unidades de funcionamiento del sistema nervioso y del medio se comportan de una manera determinada; quiero decir con esto que cuando una parte se encuentre internamente en un estado concreto y esté afectada externamente por unas condiciones concretas, se comportará solamente de una forma (se trata del tipo de determinación que poseen, por ejemplo, los relevadores y otros elementos de las centrales telefónicas). Debe advertirse que no suponemos que las unidades *últimas* estén determinadas, pues éstas son átomos, que, como sabemos, se comportan de un modo esencialmente indeterminado: la unidad significativa (*v. gr.* el relé, la corriente de varios miliamperios, la neurona) suele ser de magnitud mucho mayor que la atómica, de modo que lo significativo es solamente una propiedad media de muchísimos átomos; es frecuente que estos parámetros medios tengan un comportamiento determinado, y a ellos se aplica el supuesto que hacemos.

Hasta ahora no se ha resuelto la cuestión acerca de si las partes que componen el sistema nervioso están determinadas o son estocásticas; en este libro supondremos lo primero. Que el cerebro es capaz de comportarse de un modo sorprendentemente determinado es algo que se ha podido ver, sobre todo, gracias a ciertas hazañas memorísticas; algunas demostraciones de este tipo dependen de estados hipnóticos, y su interpretación no es lo suficientemente clara para aducirla aquí; pero Skinner ha presentado, basándose en experimentos con animales, algunos testimonios insospechados de que, si las condiciones ambientes se restauran con exactitud, el sistema nervioso puede comportarse de una forma estrictamente reproductible: valiéndose de un reforzamiento diferencial con alimento, este psicólogo adiestró veinte pichones a picotear sobre una palanca translúcida cuando se la iluminaba con una figura complicada; después los trasladó al palomar habitual, en donde no se los sometió a ningúu otro experimento, sino que sirvieron, simplemente, como sementales; y periódicamente se pusieron a prueba pequeños grupos, con objeto de detectar la retención de aquel hábito.

> "Se daba de comer al ave en el aparato experimental, en la semiobscuridad y sin que apareciese la palanca, durante varios días, al cabo de los cuales desaparecieron las reacciones emocionales al aparato. El día de la prueba se la colocó en la caja igualmente obscurecida, en la que se encontraba la palanca, pero sin iluminar; no hubo reacción. En cuanto se proyectó la figura sobre la palanca, las cuatro aves reaccionaron rápida y largamente... Esta, en concreto, picoteó en la palanca antes de que transcurriesen dos segundos desde que se presentó la figura, que no había visto en cuatro años, y justamente en el punto en que se había basado anteriormente el reforzamiento diferencial."

Por tanto, el supuesto de que las partes están determinadas no es irrazonable. Pero no necesitamos prejuzgar la cuestión: este libro constituye una tentativa de seguir las consecuencias de tal supuesto a dondequiera que nos lleven, y cuando nos conduzcan a un error notorio será momento de poner en tela de juicio su validez.

1/15. Para ser consecuentes con las asunciones hechas hemos de suponer (cosa que el autor acepta) que una verdadera solución de nuestro problema permitiría construir un sistema artificial que fuese capaz, como el cerebro vivo, de adaptarse en su comportamiento. Así pues, este trabajo, en caso de conseguir su objeto, deberá incluir (al menos por implicación) unas especificaciones respecto de la construcción de un cerebro artificial que, de un modo parecido a aquél, se autocoordine.

El saber que es preciso someter a semejante prueba la solución que propongamos obliga a imponer cierta disciplina en cuanto a los conceptos que se empleen; en particular, este requisito ayudará a evitar que la solución sea una mera "explicación" verbalista, pues al fondo se encuentra la petición de que construyamos una máquina que *haga* tales cosas.

La conciencia

1/16. Los apartados anteriores han exigido que no utilicemos los elementos subjetivos de la experiencia; y puedo anticipar que, de hecho, este libro no los utiliza. Habrá momentos en que su rígida adhesión al punto de vista objetivo puede desagradar al lector, y exponerme a mí a la acusación de que paso por alto el factor esencial. Unas palabras de explicación acaso eviten una mala inteligencia.

Ni la conciencia ni los elementos subjetivos relacionados con ella salen a relucir en todo el libro por la sencilla razón de que en ningún

punto he juzgado imprescindible introducirlos; lo cual no tiene nada de sorprendente, ya que nos ocupamos sólo de una de las propiedades del cerebro, y precisamente de una — la de aprender — que, según se ha reconocido desde hace mucho tiempo, no necesita apoyarse en la conciencia. Veamos un ejemplo que hace patente su independencia: si un ciclista quiere torcer hacia la izquierda, lo primero que ha de hacer es girar la rueda delantera hacia la *derecha* (pues de otro modo se caería hacia afuera por efecto de la fuerza centrífuga); todas las personas que saben montar en bicicleta efectúan este movimiento todas las veces que tuercen hacia un lado, y, sin embargo, muchos ciclistas, incluso después de haberlo realizado cientos de veces, no tienen la menor conciencia de él. Evidentemente, la intervención directa de la conciencia no es necesaria para el aprender adaptativo.

Esta observación, que nos enseña que la conciencia a veces no es necesaria, no nos da derecho a deducir que la conciencia no exista: la verdad es enteramente distinta, pues el hecho de la existencia de la conciencia es anterior a todos los demás hechos. Si percibo una silla — si me percato de ella —, otro testimonio posterior puede persuadirme de que su apariencia era sólo debida a un juego hábil de luces, puedo persuadirme de que la vi en sueños o incluso de que era una alucinación; pero no hay testimonio ni prueba existentes que sean capaces de persuadirme de que el percatarme mismo era un error: o sea, de que, en realidad, en absoluto me percataba de nada. Este saber de que uno se está percatando de algo es, por tanto, anterior a toda otra forma de saber y de conocimiento.

Si la conciencia es el hecho más fundamental, ¿por qué no se la utiliza en este libro? La respuesta es, en mi opinión, que la ciencia se ocupa y puede ocuparse sólo de aquello que una persona pueda hacer patente a otra. Por muy vívida que sea la conciencia para su poseedor, por ahora no se conoce método alguno de hacer patente su existencia a otro; y hasta que se encuentre tal método, o algo equivalente, los hechos de la conciencia no pueden emplearse en el método científico.

El problema

1/17. Ya es momento de plantear el problema; más tarde, cuando hayamos elaborado conceptos más exactos, será posible enunciarlo con mayor precisión (véase 5/14).

A lo largo de todo el estudio será conveniente tener un problema práctico, perfectamente conocido, que nos valga de problema tipo, de

suerte que los enunciados generales puedan siempre referirse a él. Voy a escoger el que sigue. Cuando un gatito se acerca por primera vez al fuego, sus reacciones son imprevisibles, y, por lo general, inapropiadas: puede meterse casi en él, lanzarle un bufido, tratar de acercárselo con una zarpa, intentar olisquearlo o agacharse y "perseguirlo". Sin embargo, más tarde. cuando ya es adulto, sus reacciones son muy diferentes: se acerca al fuego y se acurruca en un sitio en que el calor sea moderado; si la combustión baja, se acerca un poco más; si se desprende una brasa se aparta de un salto; el comportamiento que guarda con respecto al fuego de la chimenea es ahora "adaptativo". (Podría haber tomado como problema tipo algún experimento publicado por un laboratorio psicológico, pero el presente ejemplo ofrece diversas ventajas: es perfectamente conocido, es representativo de una amplia clase de importantes fenómenos y no es probable que se lo ponga en tela de juicio debido a haberse descubierto alguna pequeña imperfección técnica.)

Adoptamos como básicos los siguientes supuestos: que el organismo es de naturaleza mecanística, que está compuesto de partes, que el comportamiento del todo es el resultado conjunto de las actividades de las partes, que el comportamiento de los organismos cambia al aprender, y que cambia precisamente de modo que el nuevo comportamiento esté mejor adaptado a su medio que el anterior. Nuestro problema consiste, primero, en **identificar la naturaleza de los cambios que se manifiestan en el aprender,** y segundo, en **averiguar por qué tales cambios tienden a originar una adaptación mejor del conjunto del organismo.**

Los sistemas dinámicos

2/1. En el capítulo anterior hemos empleado repetidamente los conceptos de sistema, de partes de un todo, de comportamiento de un sistema y de cambios en este comportamiento. Se trata de conceptos fundamentales, que es preciso definir en forma idónea: a partir de este momento tiene la máxima importancia que demos definiciones exactas, pues cualquier vaguedad infectaría todo el debate que sigue; y puesto que hemos de penetrar en el dominio en que lo físico y lo psicológico se encuentran, región en que la experiencia de muchos siglos ha tropezado con innumerables posibilidades de confusión, es menester que avancemos con desusada cautela.

No es difícil hacer patente que se necesitan ciertas precauciones. Por ejemplo: hemos utilizado reiteradamente el concepto de "cambio del comportamiento", entre otras ocasiones al hablar de cómo el gatito dejaba de intentar acercarse un carbón incandescente y se mantenía a distancia de él; pero el comportamiento mismo consiste en una sucesión de cambios (*v. gr.*, al moverse la pata delantera de un punto a otro); ¿podemos distinguir claramente entre los cambios que forman el comportamiento y los que separan un comportamiento de otro? Son precisamente las cuestiones de este tipo las que acentúan la necesidad de ser claros y de que nos apoyemos en unos cimientos firmes. (En *I. to C.*, 1.ª parte, me he ocupado más circunstancialmente de este punto; la versión de este libro, más breve, bastará para nuestros propósitos aquí.)

Empecemos asumiendo que tenemos ante nosotros cierto sistema dinámico, esto es, algo que pueda cambiar con el tiempo; pretendemos estudiarlo; nos referiremos a él con el vocablo "máquina", que es preciso que se entienda en su acepción más amplia, pues, por el momento, no entrañamos con él otra restricción que la del carácter objetivo.

2/2. Como en este capítulo nos vamos a ocupar más de principios que de la práctica, nos dedicaremos sobre todo a elaborar un método para el estudio de semejante máquina desconocida. Una vez terminado ha de

satisfacer los requisitos que entrañan los axiomas de los apartados 1/10-15:

1) el método tiene que estar definido con precisión y en forma operativa;
2) tiene que poderse aplicar con igual facilidad (al menos, en principio) a todas las "máquinas" materiales, ya sean animadas o inanimadas;
3) el procedimiento que emplee para extraer información de la "máquina" ha de ser enteramente objetivo (es decir, accesible o patentizable para todos los observadores), y
4) tiene que extraer información únicamente de la "máquina" misma, con exclusión de toda otra fuente.

En la forma que ha adquirido de hecho, este método podrá parecer al investigador práctico desmañado e inferior a otros que vienen utilizándose. Pero no pretendo que compita con los numerosos métodos especializados en uso: éstos suelen estar adaptados a una clase particular de sistemas dinámicos — uno será apropiado, en especial, para circuitos electrónicos, otro para ratas que recorran laberintos, otro para soluciones de productos químicos que hayan de reaccionar entre sí, otro para pilotos automáticos, otro para preparaciones de corazón y pulmones—, mientras que el que aquí propongo tiene que tener la peculiaridad de ser aplicable a todos; por decirlo así, ha de especializarse en lo general.

Variable y sistema

2/3. En *I. to C.*, capítulo II, hago ver que la teoría básica puede fundarse en el concepto de estados sin analizar, de igual modo que una madre puede distinguir tres expresiones de la cara de su nene (y reaccionar del modo adecuado frente a ellas) sin necesidad de analizarlas en elementos tales como la cantidad de apertura de la boca, el grado de arrugamiento de la nariz, etc. Sin embargo, en este libro trataremos principalmente de las relaciones entre las partes; vamos a suponer, por tanto, que el observador procede a registrar el comportamiento de las partes individuales de la máquina. Ahora bien, al obrar de este modo identifica el número que sea de variables individuables; y una **variable** es *una magnitud medible que en cada instante tiene un valor numérico definido.* Un reloj de pared, por ejemplo, nos podría proporcionar las siguientes variables: la desviación angular de la péndola con respecto a la vertical, la velocidad angular con que aquélla se mueva, la posición

angular de una rueda dentada determinada, la altura a que se encuentre una de las pesas, lo que marque el minutero en su esfera y la longitud de la péndola. En caso de que se presente alguna duda acerca de si una magnitud concreta puede admitirse o no como "variable", utilizaré como criterio la posibilidad de representarla mediante una aguja indicadora sobre una escala.

Todas las magnitudes que se emplean en física, en química, en biología, en fisiología y en psicología objetiva son variables en el sentido que acabo de definir. Así, puede especificarse numéricamente la posición de un miembro mediante coordenadas de posición, y su movimiento puede hacer que se mueva una aguja sobre una escala; es posible especificar numéricamente la temperatura de un punto y registrarla en una escala; presión, ángulo, potencial eléctrico, volumen, velocidad, par, potencia, masa, viscosidad, humedad, tensión superficial, presión osmótica, densidad y el tiempo mismo — por no exceder una breve lista — pueden especificarse numéricamente e indicarse en escalas. Eddington es explícito acerca de esta cuestión: "La totalidad del objeto de la ciencia exacta consiste en lecturas de agujas indicadoras y en indicaciones análogas"; "cualquiera que sea la magnitud que estemos observando, el procedimiento realmente empleado acaba casi siempre en la lectura de la posición de algún tipo de indicador en una escala graduada o en algo equivalente a ella".

(En el próximo capítulo discutiremos la cuestión de si las lecturas en escalas están justificadas cuando se trate de seres vivos.)

Llamemos ahora la atención sobre un punto secundario que vamos a necesitar más tarde. Siempre es posible convertir la ausencia de una entidad en la lectura de una escala, sin más que considerarla presente pero con valor cero; así, podemos tratar el "aire en calma" como si fuese un viento de 0 km/h, la "obscuridad" como una iluminación de intensidad 0 candelas/cm^2, y podemos representar que se ha administrado un medicamento indicando que su concentración en los tejidos ha aumentado a partir de su valor ordinario del 0 por 100.

2/4. Se advertirá, sin duda, que *toda "máquina" real contiene un número de variables no inferior a infinito,* que han de pasarse necesariamente por alto salvo unas pocas. De este modo, si nos pusiésemos a estudiar la oscilación de un péndulo en relación con su longitud, nos interesaría su desviación angular en diversos momentos, mientras que no tendríamos en cuenta, en la mayor parte de los casos, la composición química del peso, el albedo de su superficie, la conductividad eléctrica del hilo de suspensión, la densidad, forma y envejecimiento

de la aleación de que estuviera formado el peso, su grado de contaminación bactérica, etc. (la lista de cuanto podría pasarse por alto es indefinidamente extensible). El experimentador, que se enfrenta con este infinito número de variables, tiene que escoger para su examen un número definido de ellas (y, desde luego, eso es lo que hace): dicho de otro modo, define un sistema abstracto. Así, en cierta ocasión un experimentador construyó la tabla 2/4/1: de este modo eligió unas variables — el tiempo y las otras tres — y las dispuso para la prueba; una vez terminado el experimento preparó otras tablas que incluían nuevas variables y omitían algunas de las antiguas; y todas estas nuevas combinaciones formaban nuevos sistemas.

Tiempo min	Distancia del devanado secundario cm	Zona de la piel que se estimula	Secreción de saliva durante 30 segundos, número de gotas
...	...	...	...

Tabla 2/4/1

2/5. Puesto que cualquier "máquina" real tiene una infinidad de variables, a partir de la cual puede efectuarse razonablemente una infinidad de selecciones distintas por observadores distintos (con vistas a distintas finalidades), es preciso que haya desde el principio un observador (o experimentador); y entonces se define un **sistema** como *cualquier conjunto de variables* que elija entre todas las que se encuentren en la "máquina" real; se trata, pues, de una lista enumerada por el observador, y es de naturaleza por completo diferente a tal "máquina". A lo largo de todo el libro, la expresión "el sistema" se referirá siempre a esta abstracción, y no a la "máquina" real, material.

En todos los casos, el "tiempo" será una de las variables que se registren, y por ello podría pensarse que sería menester incluirlo en la lista especificadora del sistema; sin embargo, el tiempo entra en la teoría de una forma fundamentalmente diversa a como lo hacen todas las demás (diferencia que se advierte con la máxima claridad en las ecuaciones canónicas de 19/9), y la experiencia ha mostrado que es muy conveniente clasificar el conjunto de las variables dividiéndolo en "sistema" y "tiempo"; así pues, no debe incluirse éste entre las variables del sistema. En la tabla 2/4/1, por ejemplo, "el sistema" se *define* como las tres variables de la derecha.

2/6. El **estado** de un sistema en un instante dado es el conjunto de valores numéricos que tengan sus variables en dicho instante.

De tal suerte, el sistema de seis variables del apartado 2/3 podría tener en cierto momento el siguiente estado: —4°, 0,3 rad/s, 128°, 52 cm, 42,8 min y 88,4 cm.

Dos estados son iguales si y solamente si son iguales los dos valores numéricos correspondientes a cada variable, de modo que en todas estas parejas se observe la igualdad.

El método operativo

2/7. Una vez decidido cuáles hayan de ser las variables, suponemos que se conecta el aparato registrador y que el experimentador se dispone a hacer las observaciones pertinentes. Hemos de poner en claro ahora qué es lo que asumimos en cuanto a su capacidad de regular el sistema.

Unicamente nos ocuparemos del caso en que tenga acceso a todos los estados de éste; postulamos, pues, que el experimentador puede regular cualquier variable, esto es, que puede hacer que cualquier variable tome un valor arbitrario cualquiera en un instante arbitrario cualquiera. Este postulado no especifica nada acerca de métodos; sólo pide que se consigan ciertos resultados (en la mayoría de los casos el medio a emplear es sumamente obvio: en el ejemplo de 2/3, puede imponerse una desviación angular arbitraria de la péndola en cualquier instante mediante manipulación directa, y un momento angular arbitrario en el instante que se quiera aplicando un impulso apropiado; también puede desmontarse y girarse la rueda dentada, cabe levantar la pesa, mover el minutero y bajar o subir la lenteja).

Reiterando la regulación instante tras instante, el experimentador puede obligar a una variable a tomar una serie de valores prescrita. Por consiguiente, el postulado implica que sea posible forzar a una variable cualquiera a que siga un curso determinado.

Algunos sistemas no admiten compulsión alguna: por ejemplo, los astronómicos, los meteorológicos y aquellos sistemas biológicos que son accesibles a la observación, pero no al experimento. No obstante lo cual, no es necesario ninguna modificación de principio; el experimentador espera, simplemente, hasta que, debido a los cambios naturales que se produzcan en el sistema, aparezca en él el conjunto deseado de valores, y considera el instante correspondiente como si fuese el de partida. De este modo, aun cuando no pueda crear una tormenta, puede observar cómo reaccionan a ella las golondrinas esperando, sin más, a que sobrevenga una "espontáneamente".

Asumiremos también (excepto cuando se indique explícitamente que no es así) que el observador puede regular de forma igualmente total las variables que no pertenezcan al sistema, pero que ejerzan un efecto sobre él. En el experimento de la tabla 2/4/1, por ejemplo, Pávlov no sólo podía mandar las variables mencionadas, sino asimismo las muchas variables que podrían haber afectado al comportamiento del sistema, tales como las luces que podrían haber destellado, los olores que hubieran podido invadirlo o los ruidos que pudieran haber entrado del exterior.

Suponemos que este dominio o regulación es completo porque, como veremos más adelante (y como he mostrado en *I. to C.*), ello permite formular una teoría clara, sencilla y coherente. Las teorías a que se llega al tomar en consideración una situación de tipo más realista, en la que no sean accesibles todos los estados, o en que no sea posible regular todas las variables, son enredosas y complicadas, y no son apropiadas para tomarlas como base. En cambio, cabe estudiar todas las complicadas variaciones correspondientes partiendo de una teoría básica a la que se añadan luego las modificaciones oportunas; por el momento, sin embargo, vamos a posponer tal estudio.

2/8. La **operación primaria** mediante la cual se adquieren nuevos conocimientos respecto de la "máquina" es la siguiente: el experimentador se vale de su capacidad de mando y regulación para determinar (elegir o imponer) un estado concreto del sistema, y determina (elige o impone) asimismo los valores de las condiciones que lo circunden; deja luego que transcurra una unidad de tiempo y observa el estado a que haya ido a parar el sistema al moverse impulsado por su propia naturaleza dinámica. Dicho de otro modo, observa una **transición** a partir de un estado concreto y bajo condiciones concretas.

Por lo regular, el observador quiere saber cuáles son las transiciones que se producen partiendo de muchos estados y bajo muy distintas condiciones. Por ello, suele economizar tiempo permitiendo que se sucedan en cadena: tras hallar que *B* sigue a *A* observa simplemente lo que ocurre después, y descubre de este modo cuál es la transición que parte de *B;* y así sucesivamente.

Esta descripción puede hacer que la definición dada tome visos de arbitraria y poco natural; en realidad, no hace más que delinear lo que lleva a cabo todo experimentador cuando investiga un sistema dinámico desconocido. Veamos algunos ejemplos.

En cinética química las variables son, con frecuencia, las concentraciones de las diferentes substancias. Se eligen unas concentraciones

determinadas, se las pone en presencia, y a partir de un instante definido se permite que actúen unas sobre otras a temperatura constante; el experimentador registra entonces los cambios que sufran tales concentraciones al transcurrir el tiempo.

En un experimento de mecánica las variables pueden ser las posiciones y momentos de ciertos cuerpos. Estos, que partieron de unas posiciones elegidas con velocidades asimismo elegidas, pueden entrar en interacción en un instante definido; el experimentador anota las modificaciones de velocidades y posiciones a lo largo del tiempo.

En los estudios de conducción del calor, las variables son las temperaturas de diversos puntos de un cuerpo caliente. Se impone una distribución de temperaturas prescrita y, manteniendo constantes las de ciertos puntos, se observan las variaciones de las demás a partir del momento inicial.

En fisiología las variables podrían ser la velocidad con que lata el corazón de un conejo, la intensidad de la faradización aplicada al nervio vago de este animal y la concentración de adrenalina que tenga la sangre; la intensidad estaría en todo momento regulada por el experimentador (no sería improbable que empezase siendo cero y que fuese luego aumentando); a partir de un instante dado se registrarían los cambios experimentados por las variables.

En psicología experimental, unas variables que podrían adoptarse serían el "número de errores cometidos por una rata en una prueba en un laberinto" y la "cantidad de corteza cerebral extirpada quirúrgicamente"; la segunda variable se encuentra siempre a disposición del experimentador; éste empieza el experimento y observa cómo cambia la primera variable con el tiempo mientras permanezca constante la segunda, o al modificarse ésta de una forma prescrita.

2/9. Ha sido necesario exponer de modo explícito, como acabamos de hacer, lo que el experimentador puede realizar y observar, porque (como veremos en capítulos posteriores) es preciso que no haya la menor duda acerca de *las fuentes de los conocimientos del experimentador.*

Ordinariamente, cuando éste examina una máquina utiliza sin restricciones los conocimientos que haya "recogido" en su experiencia anterior; si ve que dos ruedas dentadas engranan, sabe que las rotaciones de una y otra no serán independientes, aun cuando no llegue a verlas en rotación; este saber proviene de experiencias previas en las que se hayan sometido a examen y observado directamente las relaciones mutuas de otras parejas análogas. Los conocimientos así recogidos son, sin duda alguna, sumamente útiles, y todo experimentador diestro incorpora una

gran cantidad de ellos en cada uno de sus experimentos; sin embargo, es menester excluirlos de todo método fundamental, aunque no sea sino porque no podemos confiar enteramente en ellos: a veces sucede lo inesperado, y la única forma de estar seguro de las relaciones que existan entre las partes de una nueva máquina es la de comprobar aquéllas de modo directo.

2/10. Si bien una operación primaria aislada puede sólo proporcionar, según parece, un volumen de información muy reducido, la fuerza de este método reside en el hecho de que el experimentador pueda repetir aquélla con variaciones y relacionar las diferentes respuestas con las diferentes variaciones. Así, una vez realizada una operación primaria, la siguiente puede ejecutarse modificándola de uno de los tres modos siguientes: alterando el sistema por inclusión de nuevas variables u omisión de algunas de las antiguas, cambiando el estado inicial o variando los estados que lo circunden; al aplicar estas modificaciones sistemáticamente, en configuraciones y agrupamientos diversos, cabe comparar entre sí las diversas respuestas obtenidas y llegar de esta suerte a ciertas relaciones.

Efectuando otras modificaciones de modo ordenado será posible hacer comparaciones ulteriores, que permitan obtener relaciones secundarias (o hiperrelaciones), y así sucesivamente. De esta forma se puede conseguir que la "máquina" nos proporcione una información de complejidad creciente sobre su organización interna.

El punto fundamental de este método consiste en que la transición es un hecho puramente objetivo y patentizable; al basar todos nuestros conceptos posteriores en las propiedades de las transiciones, podemos estar seguros de que incluso los más complejos no entrañarán componente alguno que no sea objetivo y patentizable. Acabaremos por definir todos nuestros conceptos a partir de tal método; por ejemplo, en 3/8 se define así "medio" (ambiente), en 5/3 "adaptación" y en 6/5 "estímulo"; si hay alguna omisión se deberá a un descuido, pues sostengo que este procedimiento basta para su definición objetiva.

Espacio de fases y campo

2/11. Es frecuente que el experimentador, al mismo tiempo que mantiene en sus manos las condiciones externas, permita que el sistema pase de un estado a otro en un curso ininterrumpido; es decir, que si comenzó en el estado *A* y de él llegó al *B*, lo deje pasar de éste al *C*, del *C* al *D*, etc.

Una línea de comportamiento estará especificada por *una sucesión de estados y por los intervalos temporales que los separen.* Llamaremos estado **inicial** al primero de una línea de comportamiento. Dos líneas de comportamiento serán iguales si son iguales todas las parejas correspondientes de estados y todas las de intervalos temporales.

2/12. Cabe registrar las líneas de comportamiento de varias maneras.

En la figura 2/12/1 se encuentra un ejemplo del método gráfico: las cuatro variables forman, por definición, el sistema que se está estudiando; los cuatro valores simultáneos en un instante definen un estado, y la sucesión de los estados al cabo de sus intervalos propios constituye y especifica la línea de comportamiento; entonces, los cuatro trazados especifican una línea de comportamiento.

Hay ocasiones en que esta línea puede especificarse a base de funciones matemáticas elementales; esta sencillez es, sin duda, conveniente siempre que aparezca, pero es menos frecuente en la práctica de lo que podría sugerir el conocimiento de las matemáticas elementales, y cuando se emplea material biológico es muy rara.

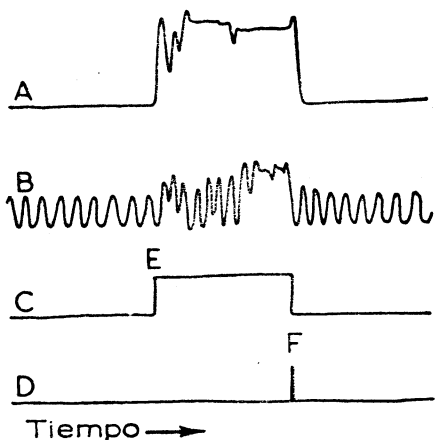


FIGURA 2/12/1.—Procesos durante un experimento de reflejos condicionados con una oveja. En la pata delantera izquierda se ha colocado un electrodo, mediante el cual puede aplicarse una sacudida eléctrica; la línea *A* registra la posición de la pezuña delantera izquierda; la *B*, los movimientos respiratorios de la oveja; la línea *C* hace ver, mediante una elevación (*E*), el período de aplicación del estímulo condicionado (sonido de un zumbador), y en la *D* se recoge la sacudida eléctrica con el trazo vertical *F*. (Según Liddell *et al.*)

Otra forma es la tabular, de la cual damos un ejemplo en la tabla 2/12/1; cada columna define un estado, y el conjunto de la tabla define una línea de comportamiento (otras tablas pueden contener más de una

línea de comportamiento); el estado correspondiente a las cero horas es el inicial.

		Tiempo (en horas)			
		0	1	3	6
Variable	w	7,35	7,26	7,28	7,29
	x	156,7	154,6	154,1	151,5
	y	110,3	116,7	118,3	118,5
	z	22,2	15,3	15,0	14,6

TABLA 2/12/1: Cambios en la sangre después de una dosis de cloruro amónico. w = pH del suero; x = base total del suero; y = cloruro del suero; z = bicarbonato del suero (las últimas expresadas en m eq/l).

La forma tabular posee una ventaja muy destacada: la de contener los hechos y nada más; pues la forma matemática tiende a sugerir demasiado: una continuidad que puede no ser patente, unos valores ficticios entre los momentos en que se ejecuten las observaciones y una precisión que acaso no exista. Salvo cuando indiquemos lo contrario, asumiremos siempre que las líneas de comportamiento se han registrado primariamente en forma tabular.

2/13. Cabe también representar el comportamiento de un sistema en un **espacio de fases,** gracias al cual cabe demostrar de modo muy sencillo muchos enunciados de prueba difícil en forma tabular.

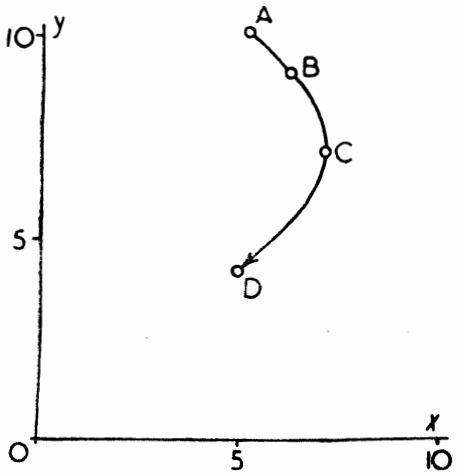


FIGURA 2/13/1.

Si un sistema se compone de dos variables, un estado concreto quedará determinado por dos números; los métodos gráficos ordinarios permiten representar las dos variables mediante unos ejes, con lo cual aquellos dos números definirán un punto en el plano correspondiente. Así, el estado en que la variable x tome el valor 5 y la variable y el valor 10 estará representado en la figura 2/13/1 por el punto *A*. *El punto cuyas coordenadas sean respectivamente iguales a los valores de las variables* en un estado es el **punto representativo** del mismo. (De acuerdo con 2/5, el "tiempo" no será nunca un eje de coordenadas.)

Supongamos ahora que un sistema de dos variables nos haya proporcionado la línea de comportamiento que se ve en la tabla 2/13/1; de acuerdo con el método indicado, marcaremos gráficamente los estados sucesivos en las posiciones *B*, *C* y D (figura 2/13/1), de modo que el comportamiento del sistema corresponderá a un movimiento del punto representativo a lo largo de la línea trazada en el espacio de fases.

Comparando una tabla y la figura respectiva es posible encontrar ciertas correspondencias exactas: todo estado del sistema corresponde unívocamente a un punto del plano, y a todo punto de éste (o de cierta zona de él) corresponde un posible estado del sistema; además, a cada línea del plano corresponde unívocamente una línea de comportamien-

Tiempo	x	y
0	5	10
1	6	9
2	7	7
3	5	4

TABLA 2/13/1

to del sistema; si éste tiene tres variables, el gráfico ha de ser tridimensional, mas a cada punto sigue correspondiendo un estado, y a cada línea del espacio de fases una línea de comportamiento; si el número de variables es superior a tres no es posible emplear físicamente este método gráfico, pero la correspondencia se mantiene exactamente la misma por numerosas que sean las variables.

2/14. *El espacio de fases que contenga todas las líneas de comportamiento que se hallen al abandonar a sí mismo un sistema a partir de todos*

los estados iniciales posibles en un conjunto concreto *de condiciones circundantes* será un **campo*** de tal sistema.

En la práctica, desde luego, el experimentador comprobará solamente una muestra representativa de los estados iniciales posibles; y es probable que algunos de ellos se sometan a ensayo repetidas veces, pues el experimentador suele querer asegurarse de que el sistema sigue líneas de comportamiento reproducibles. De este modo, en un experimento en que se había sangrado fuertemente a unos perros y se los había sometido a una dieta normal, se registraron los pesos, x, y las concentraciones de hemoglobina en la sangre, y, a intervalos semanales; este sistema de dos variables, sometido a ensayo a partir de cuatro estados iniciales por medio de treinta y seis operaciones primarias, proporcionó el campo representado en la figura 2/14/1. Más adelante propondremos con frecuencia otros ejemplos.

Debe advertirse que, según 2/9, un campo se define exclusivamente por referencia a los valores observados de las variables y a los resultados que sobre ellas ejerzan las operaciones primarias; se trata, pues, de una propiedad enteramente objetiva del sistema.

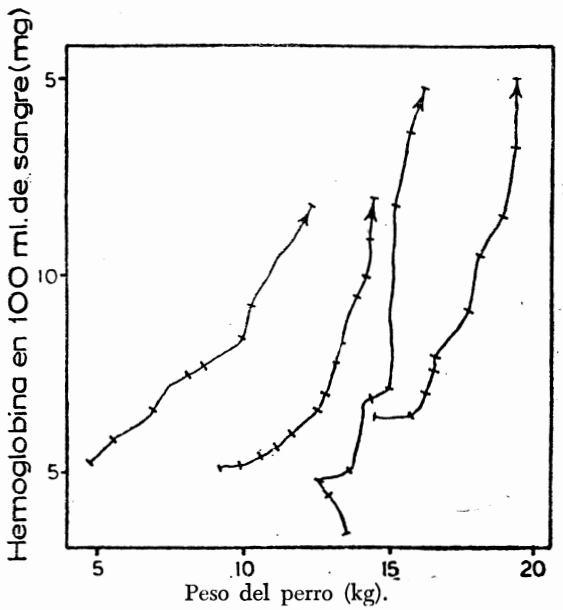


FIGURA 2/14/1. — Las flechas indican la dirección de movimiento de los puntos representativos; los trazos transversales sitúan éstos en las posiciones correspondientes a los intervalos semanales.

* Es necesario algún nombre para representaciones tales como la de la figura 2/13/1, especialmente puesto que emplearemos sin cesar, a lo largo del libro, el concepto correspondiente. Espero que pueda encontrarse una palabra mejor que "campo", mas por ahora he sido incapaz de dar con ella.

Utilizaremos ampliamente el concepto de "campo": por una parte, define el comportamiento característico del sistema, y reemplaza así al vago concepto de lo que éste "hace" o de "cómo se comporta" (que, con frecuencia, sólo se puede describir con palabras) por una construcción teorética [*construct*] precisa, la de "campo"; por otra, presenta la *totalidad* del comportamiento del sistema (en condiciones constantes) solidificado en una entidad inmutable, que podemos considerar como una unidad; y como es muy fácil comparar y contraponer estas unidades entre sí, podemos comparar un comportamiento con otro apoyándonos en un fundamento que está en nuestra mano hacer tan completo y riguroso como queramos.

Es posible que al lector le parezca a primera vista un método desusado; quienes estén familiarizados con el espacio de fases de la mecánica no encontrarán dificultad alguna, mas para otros lectores acaso se facilite la comprensión si al principio substituyen la palabra "campo" por una expresión más o menos como "modo típico de comportamiento".

Los sistemas naturales

2/15. En el apartado 2/5 hemos definido un sistema como un conjunto de variables escogido arbitrariamente. Sin que abandonemos el derecho a la elección arbitraria, cosa que sería inadmisible, ha llegado el momento de reconocer que tanto la ciencia como el sentido común insisten en que para que un sistema sea susceptible de estudio provechoso es menester que sus variables están asociadas con cierta naturalidad. Pero, ¿qué es lo "natural"? Este problema surge inevitablemente de la restricción de 2/9, en donde habíamos rechazado todos los conocimientos recogidos de otras partes; si confinamos nuestra atención en las variables vemos que toda "máquina" real nos proporciona una infinidad de éstas y que con ellas podemos formar otra infinidad de combinaciones, por todo lo cual necesitamos algún criterio que nos permita distinguir un sistema natural de uno arbitrario.

Al experimentador perito se le ocurrirá inmediatamente un criterio, puesto que sabe que si no se observa o no se regula una variable activa y pertinente, el comportamiento del sistema se vuelve caprichoso e incapaz de ser reproducido a voluntad. Podemos hacer más preciso este concepto sin gran esfuerzo: simplemente, enunciaremos de modo formalizado la idea secular de que una "máquina" es algo cuya manera de comportarse se sigue necesariamente de su estado

interno (que supondremos conocido) y de las condiciones que la circunden (igualmente conocidas); es decir, que unas condiciones circundantes concretas (o entrada [*input*], esto es, las variables que afecten a la máquina) y un estado particular determinan *unívocamente* la transición que tendrá lugar.

Con lo cual la definición formalizada se expresa así. Tómense un conjunto concreto de condiciones exteriores (o valor de la entrada), C, y un estado concreto, S, y obsérvese la transición inducida por los impulsos y leyes internos; supongamos que se llega al estado S_i; véase si la transición que parte de C y S conduce siempre a S_i, y en caso de que así ocurra anótese que las transiciones que se siguen de C y S son *invariantes*. Modifíquese luego C (o S, o ambos), de modo que se tenga otra pareja de valores, C_1 y S_1, digamos; obsérvese análogamente si las transiciones que siguen a C_1 y S_1 son invariantes. Continúese operando del mismo modo hasta que se hayan comprobado todas las parejas posibles. Si cada una de éstas da lugar a un invariante, el sistema es, por definición, una **máquina con entrada** (definición que está de acuerdo con la dada en *I. to C.*).

En el mundo de la biología el concepto de máquina con entrada aparece a menudo en la forma, especialmente sencilla, de que todos los sucesos (de un campo) se produzcan dentro de un solo conjunto de condiciones (esto es, teniendo C el mismo valor para todas las líneas de comportamiento): el campo procede entonces de un sistema aislado. Así, un experimentador puede someter un protozoo a la acción de una droga en cierta concentración y observar luego, sin efectuar más manipulaciones experimentales, toda la línea de comportamiento que se siga (que puede ser larga y compleja). Este caso aparece con suficiente frecuencia en los sistemas biológicos y en este libro para merecer un nombre especial; a partir de ahora me referiré a él con el nombre de sistema **determinado por estados.**

		Tiempo (en segundos)			
Línea	Variable	0	0.1	0.2	0.3
1	x	0	0,2	0,4	0,6
	y	2,0	2,1	2,3	2,6
2	x	— 0,2	— 0,1	0	0,1
	y	2,4	2,2	2,0	1,8

TABLA 2/15/1.

Para ilustrar la definición, consideramos la tabla 2/15/1, que presenta dos líneas de comportamiento de un sistema *no* determinado por estados. En la primera línea de comportamiento, al estado $x = 0$, $y = 2{,}0$ sigue, al cabo de 0,1 segundos, el $x = 0{,}2$, $y = 2{,}1$; en la línea 2 aparece de nuevo el estado $x = 0$, $y = 2{,}0$, pero cuando transcurren 0,1 segundos se convierte en el $x = 0{,}1$, $y = 1{,}8$, y no en el $x = 0{,}2$, $y = 2{,}1$. Puesto que los dos estados que siguen al $x = 0$, $y = 2{,}0$ no son iguales entre sí, el sistema no está determinado por estados.

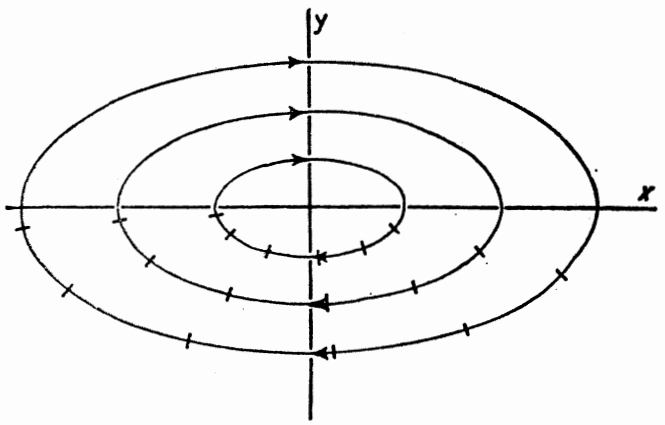


FIGURA 2/15/1. — Campo de un péndulo simple de 40 cm de longitud que oscila en un plano vertical, siendo g igual a 981 cm/s^2; x es el ángulo de desviación de la vertical e y la velocidad angular del movimiento. Los trazos transversales marcan las posiciones del punto representativo a intervalos de una décima de segundo. Adviértase el sentido de giro a derechas.

El péndulo simple que oscila en un plano vertical nos proporciona un ejemplo muy conocido de un sistema determinado por estados: se sabe que las dos variables — x, ángulo de desviación del hilo respecto de la vertical, e y, velocidad angular (o momento) de la masa — son tales que, permaneciendo constante todo lo demás, los dos valores que tengan en un instante cualquiera bastan para determinar sus propios cambios subsiguientes (véase la figura 2/15/1).

El campo de un sistema determinado por estados posee una propiedad característica, que es la de que por cada punto pasa solamente una línea de comportamiento; y cabe contraponer este hecho al correspondiente a un sistema que no esté determinado por estados. En la figura 2/15/2 se ve un campo de este último tipo (perteneciente a un sistema que describiré en 19/13); la regularidad del sistema quedaría

asentada en cuanto hallásemos que partiendo de *A* se llegaba siempre a *A'* y que partiendo de *B* se llegaba siempre a *B'*; pero no estaría determinado por estados, ya que decir que el punto representativo abandona *C* sería un dato insuficiente para definir su futura línea de comportamiento, que podría conducir tanto a *A'* como *B'*; incluso en caso de que las líneas procedentes de *A* y de *B* lleven siempre, respectivamente, a *A'* y a *B'*, tal regularidad no restringe, en modo alguno, lo que podía ocurrir si el sistema *partiese* de *C*, pues podría ir a *D*. Si se tratase de un sistema determinado por estados, las líneas *CA'*, *CB'* y *CD* coincidirían.

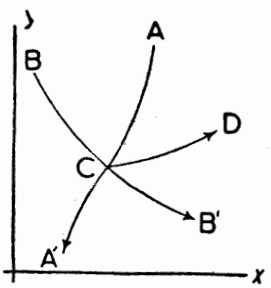


FIGURA 2/15/2. — El campo del sistema representado en la figura 19/13/1.

2/16. Podemos volver ahora a la pregunta acerca de lo que queremos decir cuando hablamos de que las variables de un sistema tienen una asociación "natural". Lo que necesitamos no es una explicación verbal, sino una definición, que debe tener las siguientes propiedades:

1) ha de consistir en un criterio que escinda todos los sistemas en dos clases;
2) su aplicación tiene que ser completamente objetiva, y
3) los resultados que proporcione han de estar de acuerdo con el sentido común en los casos típicos e indiscutidos.

La tercera propiedad hace evidente que no podemos esperar que la definición que propongamos quede asentada mediante unas pocas líneas de explicación verbal; es preciso que se la trate como una hipótesis de trabajo y que se la emplee: sólo la experiencia puede revelarnos si es defectuosa o firme. (Pese a esto, en *I. to C.*, 13/5, he expuesto ciertas razones que sugieren que la propiedad de estar determinado por estados ha de tener inevitablemente un interés fundamental para todo organismo que, como el hombre de ciencia, pretenda alcanzar dominio sobre lo que le rodee.)

Debido a su importancia, la ciencia busca tenazmente lo determinado por estados; durante siglos, el científico ha adoptado como guía de su trabajo la hipótesis de que, dado un conjunto de variables, puede encontrar siempre un conjunto más amplio que 1), incluya las variables dadas, y 2), esté determinado por estados; y gran parte del trabajo de investigación consiste en el intento de identificar semejante conjunto

más amplio, pues cuando es demasiado pequeño hay una serie de importantes variables que quedan fuera de su alcance, y el comportamiento del conjunto se vuelve caprichoso. La asunción de que existe el conjunto amplio dicho está implícita en casi todas las ciencias, pero, con todo lo fundamental que es, rara vez se la menciona explícitamente. Temple, sin embargo, se refiere a "...la asunción fundamental de la macrofísica, según la cual el estado presente de un sistema nos entrega datos suficientes para determinar de modo definido su estado en cualquier instante futuro o su respuesta a cualquier influencia externa"; y Laplace supuso lo mismo acerca de la totalidad del universo al afirmar que, dado su estado en un instante, sería calculable su progreso futuro. La definición que hemos dado arriba convierte en precisa tal asunción y la presenta en forma apta para su empleo en capítulos posteriores.

Hoy sabemos que este supuesto es falso al nivel atómico; pero rara vez tratamos de acontecimientos que se desarrollen a tal nivel, y como ha demostrado ser sustancialmente verdadero en grandes ámbitos de la ciencia macroscópica lo emplearemos constantemente.

Estrategia para los sistemas complejos

2/17. Es posible que el debate de este capítulo parezca haberse confinado dentro de un conjunto de conceptos algo arbitrario, y que el biólogo, acostumbrado a que su material cubra una amplia gama de variedades, piense que estos conceptos y definiciones son demasiado restringidos. Como el presente libro propone una teoría del origen de la adaptación, ha de mostrar cómo puede ser aceptable una teoría elaborada de una forma tan estrecha.

A este respecto hemos de advertir que hay varios tipos de teorías. En un extremo se encuentra la teoría newtoniana de la gravitación, que es al mismo tiempo sencilla, precisa y exactamente verdadera; cuando es posible semejante combinación, realmente la ciencia está de suerte. La teoría de Darwin, por otra parte, no es tan sencilla, su precisión numérica es bastante escasa y es verdadera solamente en un sentido parcial, puesto que los sencillos argumentos que se suelen emplear para aplicarla en la práctica (por ejemplo, que el rociamiento con DDT acabará por afectar a la constitución genética del ratón de campo, debido a los cambios que acarrea en su alimentación) son toscas simplificaciones de unos complejos de acontecimientos que son, en realidad, lo que ocurre.

La teoría a que esta obra pretende llegar pertenece al segundo tipo.

Los hechos reales que suceden en el cerebro son tan complejos y variados que no hay teoría que pueda confiar en que alcanzará la precisión y la sencillez de la de Newton; entonces, ¿qué es lo que tiene que hacer? Lo que yo sugiero es que trate de ser exacta en ciertos casos escogidos —escogidos en virtud de que en ellos *podamos* ser exactos—; una vez conocidos éstos, podemos enfrentarnos con la multitud de los que no corresponden enteramente a lo previsto, valiéndonos de la regla según la cual si estamos convencidos de que existe cierta continuidad en las propiedades del sistema, en la medida en que cada caso se aproxime a otro exacto sus propiedades se aproximarán a las que este último posea.

Esta estrategia científica no es, en modo alguno, de tan baja calidad como puede parecer; en realidad, muchas ciencias que gozan de buena reputación la utilizan ampliamente. Así, el gas perfecto, el resorte sin masa, el espejo totalmente reflector o el condensador sin pérdidas son elementos que se emplean con toda libertad en las teorías de la física; estos casos idealizados no tienen existencia real, pero, no obstante tal situación, poseen gran importancia, ya que son a la vez sencillos y exactos y constituyen, por tanto, puntos claves de la estructura teorética general.

Dentro del mismo espíritu, esta obra prestará gran atención a ciertos casos idealizados, cuya importancia estriba en que se los puede definir exactamente y en que su sencillez los hace manejables. Es posible que llegue a averiguarse que no existe un solo mecanismo cerebral que corresponda *exactamente* a los tipos que aquí se describen; sin embargo, el trabajo realizado no será baldío si un conocimiento a fondo de tales formas idealizadas nos permite entender el funcionamiento de muchos mecanismos que se parezcan a ellos sólo aproximadamente.

El organismo como máquina

3/1. De acuerdo con lo dicho en 1/11, vamos a suponer desde este momento que el organismo vivo no difiere esencialmente del resto de la materia ni en su naturaleza ni en sus procesos, supuesto cuya verdad no someteremos a discusión. Por consiguiente, este capítulo se ocupará únicamente de la técnica de aplicación de semejante supuesto a las complejidades de los sistemas biológicos.

La especificación del comportamiento

3/2. Si pretendemos seguir el método expuesto en el capítulo anterior, hemos de determinar primero en qué medida es posible especificar el comportamiento de los organismos mediante *variables,* recordando que la comprobación última a este respecto reside en que pueda llevarse a cabo una representación mediante lecturas en una escala graduada (cf. 2/3).

Apenas cabe dudar de que cualquier magnitud aislada observable en un organismo vivo es susceptible de ser considerada, al menos en principio, como una variable; todos los movimientos corporales pueden especificarse mediante coordenadas, y los de las articulaciones mediante ángulos; las tensiones musculares admiten especificación por su fuerza en dinas, y los movimientos de los músculos por coordenadas basadas en la estructura ósea o en algún punto fijo exterior, de modo que es posible registrarlas numéricamente; una glándula queda especificada, en cuanto a su actividad, por la tasa de secreción, y un montón de otras muchas variables, tales como el ritmo del pulso, la presión sanguínea, la temperatura, el caudal de la circulación de la sangre o el tono muscular, pueden registrarse en forma análoga.

Nuestros intentos de observar, medir y registrar en el sistema nervioso han tropezado con grandes dificultades técnicas, no obstante lo cual se ha logrado ya mucho. Actualmente es posible medir y registrar el potencial de acción, que constituye uno de los acontecimientos

esenciales de la actividad del sistema nervioso; y aunque por el momento no somos capaces de registrar directamente los estados excitatorios e inhibitorios de los centros nerviosos, no existe razón alguna por la que hayamos de suponer que nunca podremos hacerlo.

3/3. Pocas personas negarían que sea posible tratar los procesos físicoquímicos elementales del organismo vivo como variables; pero acaso algunas vacilen antes de aceptar que las lecturas hechas en escalas graduadas (y las complejas relaciones deductibles de ellas) sean adecuadas para la descripción de *todos* los acontecimientos biológicos importantes. Puesto que en el resto del libro vamos a suponer que bastan para ello, tengo que hacer ver cómo pueden reducirse las diversas complejidades de la experiencia biológica a esta forma normal.

Tenemos un caso sencillo, que cabe mencionar en primer término, cuando se registra un acontecimiento de modos tales como "en este momento se inyecta estricnina", "se enciende una luz" o "se aplica una sacudida eléctrica"; las aserciones de este tipo sólo consideran como existente el acontecimiento positivo, y pasan por alto el otro estado como algo nulo; pero pueden pasarse fácilmente a una forma numérica idónea para nuestros propósitos valiéndose del expediente mencionado en 2/3. Entonces, registraremos tales sucesos suponiendo: en el primer caso, que el animal tenía en todo momento estricnina en los tejidos, pero que inicialmente la cantidad allí presente era de 0 miligramos por cada gramo de tejido; en el segundo caso, que la luz estaba encendida siempre, pero que al principio lucía con una intensidad luminosa de 0 candelas. y en el último caso, que constantemente se aplicaba una tensión eléctrica, pero que antes de la sacudida su valor era de 0 voltios. Este método de descripción no puede ser erróneo en estos casos, ya que define exactamente el mismo conjunto de hechos objetivos; y la ventaja que presenta desde nuestro punto de vista es que nos proporciona un método que puede emplearse uniformemente en una amplia gama de fenómenos: la variable está presente siempre, y lo único que ocurre es que su valor experimenta cambios.

Pero este recurso no elimina todas las dificultades; pues hay ocasiones en que, tanto en fisiología como en psicología, una variable parece carecer de contrapartida numérica. Así, en un experimento se presentaban alternativamente ante un animal dos trozos de cartulina coloreados, uno negro y uno pardo, que servían de estímulo; por consiguiente, una variable habría de ser "color" y tendría dos valores; ahora bien, el modo más sencillo de especificar numéricamente el color es transcribir la longitud de onda de la luz correspondiente, pero no cabe em-

plear este método en nuestro caso, pues "negro" significa "sin luz", y "pardo" no es un color que se encuentre en el espectro. Nos encontraríamos con otro ejemplo en caso de que se emplease un calentador eléctrico cuyo conmutador tuviese los grados "fuerte", "medio" y "débil"; y muchos tipos de aparatos eléctricos dotados de una luz piloto que, en cuanto variable, toma sólo los valores "encendida" y "apagada", nos proporcionan otro ejemplo más. Por su parte, en los experimentos psicológicos aparecen frecuentemente ejemplos más complicados: la tabla 2/4/1, pongamos por caso, contiene la variable "zona de la piel que se estimula", la cual, en la tabla de Pávlov, tomaba solamente dos valores, "zona usual" y "zona nueva"; y en los experimentos de este científico son muy corrientes variables aún más complicadas — muchas tablas contienen una variable "estímulo" que adopta valores tales como "agua hirviendo", "metrónomo" o "destello luminoso". Una dificultad parecida se presenta cuando el experimentador estudia cómo responde el animal a la inyección de toxinas, de suerte que se encuentra la variable "tipo de toxina", que acaso tome los valores "difteria tipo grave" y "difteria tipo medio". Finalmente, el cambio puede entrañar una reorganización bastante completa del conjunto de la situación experimental: así ocurriría si el experimentador, queriendo comprobar el efecto del ambiente general, estudiase lo que sucedía al dar a la variable "situación del experimento" los dos valores alternativos "en el albergue del animal" y "al aire libre". ¿Pueden representarse variables semejantes mediante un número?

En algunos de los ejemplos dados sería factible caracterizarlas numéricamente especificado con mayor o menor detalle su índole física; así, la "zona de la piel que se estimula" podría especificarse haciendo referencia a un sistema de coordenadas trazado en la piel, y se podría hacer lo mismo con las tres intensidades de la estufa eléctrica valiéndose de los tres valores correspondientes de la potencia consumida. Pero este método apenas es posible en los restantes casos, si bien tampoco es necesario, pues los números pueden utilizarse tanto cardinalmente cuanto ordinalmente, esto es, se pueden emplear como meros marbetes, con entera independencia de su orden natural; de esta índole son los números con que se designan las divisiones de un ejército, y los de los abonados a un sistema telefónico, pues el abonado cuyo número sea, digamos, el 4051, no guarda ninguna relación especial con aquél a quien haya correspondido el 4052 —los números los identifican, pero no los relacionan.

Puede demostrarse (véase 21/6) que si una variable toma unos pocos valores que no se encuentran en ninguna relación sencilla, es po-

sible atribuir a cada uno un número arbitrario; y, suponiendo que estos números se empleen sistemáticamente a lo largo de todo el experimento, no puede surgir de tal asignación confusión alguna. De este modo, a la variable "situación del experimento" podría asignársele el valor arbitrario "1" cuando el experimento se lleve a cabo en el albergue del animal, y el "2" cuando se efectúe al aire libre.

Aun cuando la "situación del experimento" implica gran número de variables físicas, el agregado constituído por todas ellas puede considerarse como una variable única siempre que aquél se disponga de modo que en todo momento se empleen como un agregado que pueda tomar o una u otra de las formas descritas. Pero si, por el contrario, se escindiese éste durante el experimento, como ocurriría si registrásemos cuatro clases de resultados, a saber:

1) en el albergue del animal, en verano,
2) en el albergue del animal, en invierno,
3) al aire libre, en verano, y
4) al aire libre, en invierno,

tendríamos, o bien que permitir que la variable "situación del experimento" tomase cuatro valores, o bien que considerar la presencia de dos variables, "lugar del experimento" y "estación del año", cada una de las cuales tomaría dos valores. Según este método, lo que importa no es la estructura material de los dispositivos técnicos, sino la estructura lógica del experimento.

3/4. Mas, con todo, ¿es adecuado el método? ¿Pueden reducirse de este modo a números todas las cualidades de índole más sutil de los organismos vivos? Ha habido muchas discusiones sobre este punto, pero podemos evitar parte de la controversia: pues aquí sólo nos ocupamos de ciertas cualidades que hemos definido.

En primer lugar, no trataremos con cualidades, sino con el comportamiento; no con lo que el organismo sienta o piense, sino con lo que haga. La omisión de todos los aspectos subjetivos (recuérdese 1/16) elimina del debate las cualidades más impalpables, mientras que la restricción al comportamiento manifiesto suele hacer fácil la tarea de especificarlo mediante variables. En segundo término, cuando el lector no matemático piensa que existen magnitudes complejas que no pueden representarse de un modo adecuado mediante números, tiende a pensar en su representación valiéndose de una sola variable; pero la utilización de muchas permite manejar sistemas de considerable com-

plejidad; así, un sistema tan complejo como "el tiempo que haga en Inglaterra", que no puede estudiarse de modo adecuado con una sola variable, es susceptible de un estudio tan adecuado como queramos merced al empleo de gran cantidad de ellas.

3/5. Daremos dos ejemplos que ilustren el método de especificación del comportamiento de un sistema mediante variables; su interés intrínseco es muy escaso; de mayor importancia es el hecho de que hacen patente que el método es exacto y que cabe ampliarlo en cualquier medida sin pérdida de precisión.

El primero procede de un experimento fisiológico. Se sometió a un perro a una pérdida constante de sangre en cantidad del 1 por 100 de su peso por minuto, y se registraron tres variables:

x) caudal de sangre por la vena cava inferior,
y) " " " " los músculos de una pata, y
z) " " " " el intestino.

En la figura 3/5/1 se ven los cambios experimentados por los valores de las variables con el tiempo; estos cambios presentan un aspecto característico, pues la circulación de la sangre por la pata y el intestino cae más que la correspondiente a la vena cava inferior, diferencia que es característica de la reacción del cuerpo ante la hemorragia. El empleo de más de una variable ha permitido mostrar el *aspecto* de la reacción.

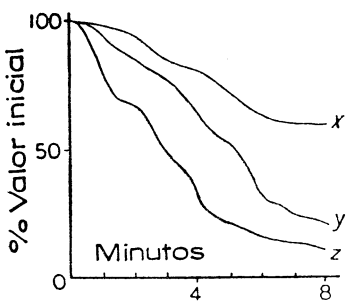


FIGURA 3/5/1. — Efectos de una hemorragia en el caudal sanguíneo de, *x*) la vena cava inferior, *y*) los músculos de una pata y *z*) el intestino. (Según Rein.)

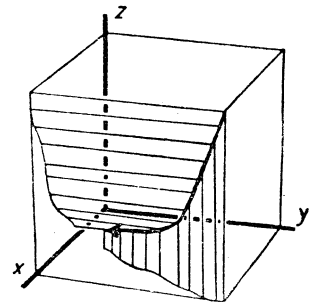


FIGURA 3/5/2. — Espacio de fases y línea de comportamiento de los datos recogidos en la figura 3/5/1.

Los cambios citados especifican una línea de comportamiento, que está dibujada en la figura 3/5/2; en caso de que esta línea hubiese apuntado en otra dirección, tendríamos una modificación que corres-

pondería a una modificación del aspecto de la reacción corporal a la hemorragia.

El segundo ejemplo utiliza ciertos ángulos medidos en un registro cinematográfico de las actividades de un hombre. El cuerpo de éste se movía hacia adelante, pero a la vez se mantenía vertical: las cuatro variables eran:

w) ángulo entre el muslo derecho y la vertical,
x) " " " " izquierdo y la vertical,
y) " " " " derecho y la tibia derecha, y
z) " " " " izquierdo y la tibia izquierda.

En *w* y *x* el ángulo se considera positivo cuando la rodilla avanza; en *y* y *z* los ángulos se miden por detrás de la rodilla. En la tabla 3/5/1 queda especificada la línea de comportamiento correspondiente. (El lector puede identificar sin dificultades esta conocida actividad.)

		Tiempo (en segundos).								
		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0 6	0.7	0.8
Variable	*w*	45	10	— 10	— 20	— 35	0	60	70	45
	x	— 35	0	60	70	45	10	— 10	— 20	— 35
	y	170	180	180	160	120	80	60	100	170
	z	120	80	60	100	170	180	180	160	120

TABLA 3/5/1

3/6. Por lo general, en los experimentos fisiológicos se admite que el sistema nervioso está determinado por estados; antes de empezar a trabajar, todo fisiólogo supone que cabe hacer que posea esta propiedad, ya que asume que está sujeto a la suposición fundamental de 2/15: la de que si pudieran determinarse todos sus detalles, también quedaría determinado su comportamiento subsiguiente. Y muchas técnicas especializadas, tales como anestesia, sección completa de la médula, sección del tronco encefálico e inmovilización mediante pinzas del cuerpo y de la cabeza, se utilizan precisamente para garantizar un aislamiento adecuado del sistema, lo cual es una condición necesaria para que éste se encuentre determinado por estados (véase 2/15). De modo que, salvo que existan razones especiales en contra, en los experimentos fisiológicos se puede suponer, por regla general, que el sistema nervioso está determinado por estados.

3/7. Parecidamente, se suele admitir que un animal sometido a experimentos que exploren sus reflejos condicionados es un sistema físicoquímico tal que si conociésemos todos sus detalles podríamos predecir su comportamiento; y la insistencia de Pávlov acerca del aislamiento completo pretendía asegurar que así ocurriese. De suerte que, a menos que haya alguna razón especial que lo contradiga, puede asumirse, en general, que un animal sometido a un experimento de reflejos condicionados se encuentra determinado por estados.

3/8. Sin embargo, hemos mencionado estos dos ejemplos únicamente a título de introducción; pues nos vamos a ocupar, ante todo, de la naturaleza de los organismos en su vida libre dentro de su medio natural.

Dado un organismo, definimos su medio como *las variables cuyos cambios afecten al organismo y las que queden modificadas por virtud del comportamiento de éste.* De esta forma se lo define en un sentido puramente funcional, en vez de material; y lo trataremos de igual modo que todas las variables: supondremos que es representable mediante escalas graduadas, que es explorable (por el experimentador) mediante operaciones primarias y que está intrínsecamente determinado por estados.

Organismo y medio

3/9. Podemos enunciar ahora el tema de este capítulo; es posible representar con suficiente exactitud el organismo viviendo en libertad y su medio, tomados conjuntamente, mediante un conjunto de variables que forme un sistema determinado por estados.

Los conceptos elaborados en los apartados anteriores nos permiten tratar el organismo y el medio con métodos idénticos, ya que hemos hecho iguales asunciones primarias acerca de ambos.

3/10. Tomemos, como ejemplo de que el organismo y su medio forman un solo sistema determinado por estados, el caso de la bicicleta y el ciclista en su marcha normal (atendiendo sólo a las actividades que permiten el mantenimiento del equilibrio).

En primer lugar, podemos eliminar el movimiento hacia adelante, ya que el estudio de las propiedades de este sistema dinámico se podría realizar con igual facilidad si las ruedas girasen sobre una cinta que se desplazase hacia atrás. Para identificar las variables, atendamos a lo que ocurre. Supongamos que el ciclista tire con la mano

derecha hacia atrás; entonces modificará la posición angular de la rueda delantera (si tomamos como referencia el plano del cuadro); este ángulo, al cambiar, hará que los dos puntos en que las ruedas están en contacto con el suelo empiecen a moverse hacia la derecha (las razones físicas de este movimiento no son pertinentes ahora; nos basta el hecho de que la relación esté determinada); como el centro de gravedad del ciclista al principio no se mueve, la proyección vertical sobre el terreno de tal centro se encontrará cada vez más a la izquierda de la línea que una aquellos dos puntos, y, en consecuencia, el ciclista comenzará a caerse hacia la izquierda; pero esta caída excitará los terminales nerviosos de los órganos de equilibrio del oído, se transmitirán unos impulsos al sistema nervioso y — si se trata de una persona que sepa montar en bicicleta — circularán por su interior siguiendo una ruta tal que, o bien ellos mismos, o los efectos a que den lugar, exciten y pongan en actividad los músculos que hacen empujar con la mano *derecha* hacia adelante.

Podemos especificar ahora las variables que han de formar el sistema para que esté determinado por estados. Estas tienen que incluir: la posición angular del manillar, la velocidad del movimiento lateral de los dos puntos de contacto entre las ruedas y el terreno, la distancia lateral entre la línea de unión de estos puntos y la proyección vertical sobre el terreno del centro de gravedad del ciclista, y la desviación angular de éste con respecto a la vertical. De acuerdo con 3/8, definimos estas cuatro variables como el "medio" del ciclista (la cuarta variable puede atribuirse tanto al "ciclista" como el "medio", según se prefiera (cf. 3/12)); y, para hacer que el sistema esté determinado por estados, es preciso añadir las variables del sistema nervioso, de los músculos pertinentes y de las posiciones de los huesos y de las articulaciones.

Como segundo ejemplo, consideremos una mariposa y un pájaro en vuelo, éste a la caza de aquélla y ella esquivándole. Ambos se apoyan en el aire que los circunde; cada movimiento del pájaro estimula los ojos de la mariposa, estímulo que, actuando a través de su sistema nervioso, da origen a cambios en los movimientos que efectúe con las alas; y éstos actúan sobre el aire que la envuelva, produciendo cambios de posición de la mariposa. Cada uno de estos últimos cambios modifica inmediatamente las excitaciones de los ojos del pájaro, lo cual conduce, a través de su sistema nervioso, a modificar los movimientos que realice con las alas; éstos, a su vez, actúan sobre el aire y varían la posición del pájaro. Y así se continúa el proceso. El medio del pájaro está constituído por el aire y la mariposa, mientras

que el de ésta es el aire y el pájaro; y podemos suponer razonablemente que el total está determinado por estados.

3/11. El organismo afecta al medio, y éste al organismo; de un sistema de este tipo se dice que tiene "retroacción" o "realimentación" (cf. 4/14).

Los ejemplos que hemos presentado en el apartado anterior son ilustrativos a este respecto. Los músculos del brazo del ciclista mueven el manillar, dando lugar a cambios en el medio; y éstos, tras pasar por los receptores sensoriales del ciclista, producen cambios en su cerebro y en sus músculos. Cuando el pájaro y la mariposa maniobran en el aire, cada desviación de uno origina desviaciones reactivas en el otro.

El ejemplo del apartado 1/17 — el problema tipo del minino y el fuego — ofrece igual característica; los diversos estímulos que proceden del fuego, actuando a través del sistema nervioso, suscitan cierta reacción de los músculos del gatito; e, igualmente, los movimientos de éste, debido a alterar la posición de su cuerpo con relación al fuego, son causa de que la configuración de estímulos que incidía sobre sus órganos sensoriales sufra ciertas modificaciones. Así pues, los receptores afectan a los músculos (a través de efectos transmitidos por el sistema nervioso), y éstos afectan a aquéllos (a través de efectos transmitidos por el medio); la acción se produce en ambos sentidos, y el sistema posee realimentación.

Esta observación no es nueva:

> "En la mayoría de los casos, las modificaciones que inducen una reacción están originadas por los mismos movimientos del organismo: éstos producen una alteración de las relaciones entre organismo y medio, alteración frente a la que aquél reacciona. Todo el comportamiento del organismo que se mueve libremente está basado en el principio de que son sus propios movimientos los que han dado origen a la estimulación."
>
> (JENNINGS.)

> "Un buen jugador de un juego de pelota veloz, un cirujano realizando una operación, un médico que llega a una decisión clínica: en todos estos casos hay una circulación que va de las señales interpretadas a la acción que se ejecute, de ésta a ulteriores señales y otra vez a una nueva acción, hasta llegar al punto culminante en que se da cima a la tarea."
>
> (BARTLETT.)

> "El organismo y el medio forman un todo, y es menester que se los mire como tal."
>
> (STARLING.)

Es necesario que señalemos la existencia de realimentación en las relaciones entre el organismo en su vida libre y el medio, porque la mayoría de los experimentos fisiológicos están deliberadamente planeados de tal suerte que se elimine la realimentación. Así, en los experimentos sobre reflejos espinales se aplica un estímulo y se registra el movimiento resultante, pero no se permite que tal movimiento influya en la naturaleza ni en la duración del estímulo: la acción entre éste y aquél es, por tanto, de dirección única. En los experimentos pavlovianos sobre reflejos condicionados se impone una ausencia análoga de retroacción: el estímulo puede suscitar la salivación, pero ésta carece de efecto sobre la índole y sobre la persistencia de aquél.

Semejante ausencia de realimentación es, desde luego, muy útil, o incluso esencial, en el estudio analítico del comportamiento de un mecanismo, ya sea animado o inanimado; pero su utilidad en el laboratorio no debe velar el hecho de que el animal no está sujeto a tales limitaciones en su vida libre.

A veces, algunos sistemas que a primera vista parecen ser de dirección única resultan poseer realimentación cuando se los examina más de cerca. El andar sobre un pavimento liso, por ejemplo, parece entrañar una referencia tan escasa a las estructuras exteriores al cuerpo que posiblemente se piense que el sistema nervioso actúa sin referirse a sus efectos; sin embargo, la *tabes dorsalis* impide que los impulsos sensoriales, que son centrípetos, lleguen al cerebro, en tanto que no altera los centrífugos impulsos motores, de modo que, si el andar se debiera simplemente a estos últimos, tal enfermedad no lo perturbaría; pero, de hecho, trastorna gravemente esta actividad, y hace ver que los impulsos procedentes del exterior desempeñan realmente un papel esencial, si bien oculto, en la acción normal.

Tenemos otro ejemplo que hace patente la influencia de la realimentación cuando intentamos situar con exactitud un punto (*verbi gratia*, cuando pretendemos pasar un alambre a través de un pequeño orificio de un panel) sin que podamos ver el error que estemos cometiendo (en el caso indicado, cuando queremos enfilar el orificio por el lado opuesto a nosotros, aproximando el alambre); las dificultades que encontramos se deben precisamente al hecho de que, si bien podemos actuar sobre los movimientos del alambre, éstos y las relaciones que guarden con el orificio no pueden comunicársenos ni, por tanto, reobrar sobre nosotros.

Hay ocasiones en que no es fácil hacer patente la retroacción. Así, Lloyd Morgan crió unos polluelos de pato en una incubadora:

> "Los patitos disfrutaban mucho dándose un chapuzón; todas las mañanas, a las nueve, se colocaba en su corral una gran bandeja negra sobre la cual había una cubeta de poca altura con agua, y ellos corrían apresuradamente, bebían y se bañaban en ella. La sexta mañana se colocaron la bandeja y la cubeta del modo usual, pero completamente vacías. Los animalitos corrieron hacia allí, saltaron al fondo y ejecutaron todos los movimientos del pico como si bebiesen; se agachaban, sumergían la cabeza y sacudían la cola como siempre; durante diez minutos siguieron lavándose en un agua inexistente..."

Este comportamiento podría sugerir que los estímulos procedentes de la bandeja y la cubeta llevaban a ejecutar ciertas actividades cuyos resultados carecían de efecto de retorno, pero ulteriores experimentos hicieron ver que había algún efecto:

> "Al día siguiente repetimos el experimento con la cubeta vacía. Otra vez corrieron hacia ella, metían el pico hasta el fondo y lo alzaban luego, y se agachaban sobre él; pero pronto dejaron de hacerlo. La tercera mañana se bambolearon hasta la seca cubeta y se alejaron."

Su primer comportamiento hacía pensar que no había realimentación, pero el cambio que se produjo al tercer día puso de manifiesto que, en realidad, la modificación del baño había producido en ellos un efecto.

La importancia de la retroacción descansa en el hecho de que los sistemas que la poseen tienen ciertas propiedades (véase 4/16) que no presentan los que carecen de ella; *los sistemas con realimentación no pueden tratarse de modo adecuado como si fuesen de acción de dirección única,* puesto que aquélla introduce propiedades sólo explicables por referencia a la realimentación concreta que se utilice. (Por el contrario, no se introduce ningún error cuando se trata un sistema de dirección única como si tuviese retroacción; en este caso suponemos que una de las dos acciones, aun estando presente, tiene grado cero (recuérdese 2/3). Dicho de otro modo, los sistemas sin realimentación constituyen una subclase de la clase de los sistemas con realimentación).

3/12. Como los dos componentes que nos interesan han de tratarse como si formasen un solo sistema, la línea divisoria entre "organismo" y "medio" se convierte parcialmente en conceptual, y, en igual medida, en arbitraria. Naturalmente, por lo regular existe, tanto anatómica como físicamente, una distinción única y notoria entre las dos partes del sistema; pero si miramos éste funcionalmente, pasando por alto los

hechos puramente anatómicos como no pertinentes, su división en "organismo" y "medio" pasa a ser bastante vaga. Así, si un mecánico dotado de un brazo ortopédico trata de reparar una máquina, lo mismo podemos considerar dicho brazo como parte del organismo que forcejea con ésta que entender que forma parte de la maquinaria con la que forcejea el ser humano.

Una vez admitida esta flexibilidad en las divisiones, apenas cabe poner límites a su aplicación; es posible mirar el cincel manejado por un escultor como parte de un complejo mecanismo biofísico que está dando forma al mármol y como parte del material que el sistema nervioso trata de dominar; análogamente, los huesos del brazo del escultor pueden considerarse lo mismo como parte del organismo que como parte del "medio" de su sistema nervioso. No carece de justificación tomar ciertas variables pertenecientes al cuerpo como "medio" de alguna otra parte de éste: el niño no sólo tiene que aprender a agarrar un trozo de pan, sino también a masticar sin morderse la lengua; de modo que, funcionalmente, tanto el pan como la lengua forman parte del medio de la corteza cerebral. Pero los medios con que tiene que tratar ésta pertenecen, en ocasiones, a un estrato corporal todavía más profundo que la lengua; pues el niño ha de aprender a jugar sin llegar a agotarse y a hablar sin perder el aliento.

Estas observaciones no pretenden causar confusión alguna, sino hacer ver que otras argumentaciones que expondremos más tarde (en los capítulos XV y XVI) no son irrazonables. En éstas se pretende tratar un grupo de neuronas del cerebro como medio de otro grupo; y estas divisiones, aunque arbitrarias, tienen su justificación, puesto que vamos a ocuparnos siempre del sistema como de un todo, dividiéndolo en partes de esta forma tan desacostumbrada meramente por razones de facilidad de descripción.

Debe advertirse que de ahora en adelante designaremos con "el sistema" no el sistema nervioso, sino el complejo entero formado por el organismo y su medio. De este modo, si se hace ver que "el sistema" posee cierta propiedad, no ha de suponerse que ésta se atribuya al sistema nervioso: pertenece al conjunto; y acaso se precise un examen detallado para evaluar las aportaciones de sus distintas partes.

3/13. Hay algunos casos en que es posible hacer intuitivamente más clara la naturaleza dinámica de la interacción entre organismo y medio valiéndose del recurso, muy corriente en física, de considerar el animal como centro de referencia: entonces, en la locomoción tomaremos el animal como si empujase el mundo detrás de sí; y con tal de que nos

ocupemos solamente de la relación entre ambos, dejando de lado las que puedan guardar con un tercer cuerpo independiente, sea éste el que sea, semejante expediente no puede inducirnos a error (es el que hemos empleado en el ejemplo de "el ciclista y la bicicleta").

Mediante la utilización de coordenadas centradas en el animal podemos ver que éste posee un dominio sobre su medio mucho mayor de lo que parece posible a primera vista; así, si bien una rana no puede cambiar el aire en agua, la que se encuentre en el ribazo de un arroyo puede perfectamente, sin más que dar un pequeño salto, cambiar su mundo, haciéndolo pasar de estar sometido a las leyes de la mecánica a regirse por las de la hidrodinámica.

Las variables esenciales

3/14. Es menester que el biólogo no mire al cerebro como asiento de la "mente" ni como algo que "piensa", sino, de igual modo que cualquier otro órgano del cuerpo, como un instrumento especializado para sobrevivir (cf. 1/10). Vamos a hacer un uso muy repetido del concepto de "supervivencia"; pero antes de poder emplearlo tenemos que transformarlo, de acuerdo con 2/10, hasta que adopte nuestra forma normal, explicando qué es lo que significa en cuanto a operaciones primarias.

Los sistemas fisicoquímicos pueden sufrir las transformaciones más completas sin presentar ningún cambio que sea notoriamente equivalente a la muerte, pues la materia y la energía son indestructibles. Sin embargo, la diferencia entre un caballo vivo y uno muerto es harto obvia, y, además, no pueden existir dudas en cuanto a su carácter objetivo, puesto que alcanzan precios enteramente distintos en el mercado. Semejante diferencia ha de ser susceptible, pues, de definición objetiva.

Sugerimos la siguiente vía para definir lo que queremos. Para que un animal pueda permanecer "vivo" hay algunas variables que tienen que mantenerse dentro de ciertos límites "fisiológicos". Cuáles son estas variables y cuáles sus límites son cosas que quedan fijadas cuando se fija la especie (en la práctica no se experimenta con animales en general, sino con uno de una especie concreta, por lo demás). En cada especie las múltiples variables fisiológicas existentes son muy distintas en lo que se refiere a su importancia para la supervivencia; así, el acortar el pelo de un hombre de 10 a 2,5 cm constituye un cambio trivial, pero si la tensión sanguínea en sístole desciende de 120 mm de mercurio a 30, el efecto del cambio será rápidamente fatal.

Cada especie posee cierto número de variables que están en estrecha relación con la supervivencia y vinculadas dinámicamente entre sí de modo muy apretado, en forma tal que unas modificaciones notables de una cualquiera de ellas acaban por originar cambios también importantes en las otras. De este modo, si encontramos que el ritmo del pulso de una rata ha caído a cero, podemos predecir que el ritmo respiratorio pasará pronto asimismo a cero, que la temperatura del cuerpo descenderá rápidamente a la temperatura ambiente y que el número de bacterias que se encuentren en sus tejidos subirá en poco tiempo desde casi cero a una cifra sumamente elevada. Llamaremos variables *esenciales* del animal estas variables tan importantes y tan estrechamente vinculadas.

¿Cómo podremos descubrirlas, sabiendo que no nos está permitido valernos de conocimientos recogidos de otros dominios, sino que hemos de encontrarlas por los métodos del capítulo II? No hay dificultad alguna. Dada una especie, observamos lo que ocurre después de que varios miembros de aquélla partan de una serie de estados iniciales distintos: encontraremos que a grandes modificaciones iniciales de ciertas variable siguen desviaciones del sistema meramente transitorias, mientras que las modificaciones de análoga importancia de otras dan lugar a desviaciones que se hacen cada vez mayores, hasta que la "máquina" pasa a ser algo muy diferente de lo que era al comienzo. Por consiguiente, el resultado que se obtenga con estas operaciones primarias discriminará de un modo enteramente objetivo entre las variables esenciales y las demás.

3/15. Las variables esenciales no son uniformes en cuanto a cercanía ni apremio de sus relaciones con la letalidad. Algunas de ellas (como la cantidad de oxígeno de la sangre o la integridad estructural de la médula oblonga) son tales que en cuanto se traspasan los límites normales se sigue la muerte casi inmediatamente; en otras, como la integridad de un hueso de una pierna o el grado de infección de la cavidad peritoneal, la salida de tales límites puede considerarse como grave, pero no como necesariamente fatal. Así pues, hay variables (tales una presión muy elevada o una temperatura muy fuerte en alguna zona de la piel) que pueden exceder las cotas normales sin causar un peligro inmediato, pero esta transgresión se encuentra en una correlación tan frecuente con la cercanía de alguna amenaza *realmente* grave, que el organismo evita las situaciones correspondientes (a las que llamamos "dolorosas") de igual modo que si fuesen potencialmente letales. Todo lo que exigimos es que sea posible colocar las variables del animal en

orden aproximado de importancia; y las inexactitudes que puedan cometerse en la ordenación carecen de gravedad, pues en ningún momento hemos de utilizar un orden concreto como base para ninguna deducción concreta.

Con lo cual podemos definir "supervivencia" objetivamente y apoyándonos en el concepto de campo: se encuentra cuando una línea de comportamiento no lleva ninguna variable esencial fuera de los límites dados.

La estabilidad

4/1. Las expresiones "estabilidad", "estado estacionario" y "equilibrio" se emplean por muchos autores con muy distintos significados, aun cuando existe siempre idéntico tema subyacente. Como nos vamos a ocupar en abundancia de la estabilidad y de sus propiedades, hemos de dar una definición exacta de ella.

Podemos comenzar la cuestión presentando los tres ejemplos elementales de rigor: un cubo descansando por una cara sobre una superfiicie horizontal constituye el tipo del equilibrio "estable"; una esfera colocada en una superficie horizontal lo es del equilibrio "indiferente", y un cono en equilibrio sobre su vértice forma el ejemplo clásico de equilibrio "inestable". Apenas nos ocuparemos de estos dos últimos géneros, pero sí hemos de utilizar repetidamente el concepto de "equilibrio estable".

El comportamiento de estos tres sistemas dinámicos sufre una restricción importante, debida al hecho de que cada uno de ellos contiene una cantidad fija de energía, de suerte que cualquier movimiento subsiguiente tiene que producirse de conformidad con esta invariancia. Sin embargo, nosotros vamos a considerar sistemas que estén abundantemente provistos de energía libre, de forma que no se les imponga tal limitación. Veamos un par de ejemplos.

El primero es el regulador de Watt. Una máquina de vapor hace girar dos contrapesos que se separan entre sí, por virtud de la acción centrífuga, tanto más cuando mayor sea la velocidad de rotación; su separación manda mecánicamente la posición de la válvula de admisión, y ésta permite así que entre más o menos caudal de vapor a la máquina. Las conexiones entre todos estos órganos son tales que un aumento de la velocidad de la máquina origine una disminución del peso de vapor admitido; y el resultado es que si una perturbación transitoria retarda o acelera la máquina, el regulador hace que la velocidad vuelva a su valor ordinario (retorno por el que el sistema patentiza su estabilidad).

El segundo ejemplo es el termostato, del cual existen numerosos

tipos. Todos ellos, sin embargo, funcionan basados en el mismo principio: cualquier enfriamiento del objeto principal produce un cambio que, a su vez, hace que el calentamiento se vuelva más intenso o más eficaz, y a la inversa. De ello resulta que en caso de que una perturbación transitoria cualquiera enfríe o caliente excesivamente el objeto principal, el termostato hace que la temperatura recupere su nivel normal (con lo cual el sistema manifiesta su estabilidad).

4/2. Un rasgo importante de la estabilidad es que no se refiere al cuerpo o "máquina" materiales, sino sólo a cierto aspecto de ellos; afirmación que puede demostrarse del modo más sencillo haciendo ver que uno y el mismo cuerpo material puede encontrarse simultáneamente en dos situaciones distintas en cuanto al equilibrio; pues pensemos en una tarjeta rectangular que se mantenga en éste apoyada en uno de sus bordes: el equilibrio será inestable frente a desplazamientos perpendiculares a dicho borde, mientras que será estable, al menos teóricamente, con respecto a los que sean exactamente paralelos al mismo.

Este ejemplo apoya la tesis de que lo que estamos haciendo, en general, no es estudiar cuerpos físicos, sino únicamente entidades cuidadosamente abstraídas de ellos; punto, a su vez, que se aclarará si, de acuerdo con los requisitos de 2/10, definimos la estabilidad a partir de resultados de operaciones primarias — según vamos a hacer del modo que sigue.

4/3. Consideremos una superficie ondulada colocada horizontalmente y una bola que ruede de una cresta a un surco de ella (una fotografía que se tome a mitad del descenso presentará un aspecto semejante al de la figura 4/3/1). Podríamos pensar que la bola es inestable, por haberse escapado rodando de la cresta, hasta que nos percatemos de que cabría también considerarla estable, por haber rodado hacia el surco; dualidad que muestra que estamos acercándonos al concepto en forma equivocada. Se puede aclarar la situación retirando la bola y parando mientes sólo en la superficie: así reconocemos que la cima de la cresta constituye una posición de equilibrio inestable (en cuanto al modo de afectar a la rodadura de una bola) y el fondo del surco de equilibrio estable. Ahora nos damos cuenta de que, si el ro-

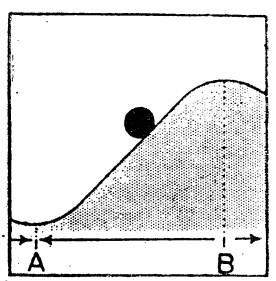


FIGURA 4/3/1.

zamiento es suficientemente grande para que podamos desdeñar el impulso o momento, el sistema formado por la variable única "distancia lateral de la bola" está determinado por estados, y tiene un campo definido y permanente, bosquejado en la misma figura anterior.

A partir de *B* las líneas de comportamiento divergen, mientras que convergen hacia *A*. Concluímos provisionalmente que el concepto de "estabilidad" no corresponde a un cuerpo material, sino a un campo: lo presenta todo campo en que las líneas de comportamiento converjan. (En 4/8 daremos una definición exacta).

4/4. Los puntos *A* y *B* son tales que si se abandonase la bola en uno cualquiera de ellos y se tratase de una bola matemáticamente perfecta, allí se quedaría. Dado un campo, un estado del cual no se mueva el punto representativo es un *estado de equilibrio;* y cuando se aplica la operación primaria que lo lleve allí, la transición que parte de tal estado puede describirse con las palabras "a sí mismo".

(Adviértase que esta definición, aunque indica lo que sucede *en* el estado de equilibrio, no impone ninguna restricción a la forma que puedan tener las líneas de comportamiento en derredor suyo: pueden converger sobre él, diverger o seguir otras rutas).

Si bien no se produce cambio alguno de las variables cuando el sistema se encuentra en un estado de equilibrio, esta invariancia no implica que la "máquina" permanezca inactiva: un regulador de Watt es perfectamente compatible con el funcionamiento de la máquina a velocidad no nula. (En *I. to C.*, 11/15, se trata esta cuestión más extensamente).

4/5. Como ilustración de que el concepto de estabilidad corresponde a los campos, examinemos los de los ejemplos anteriores.

El cubo apoyado sobre una cara da lugar a un sistema determinado por estados que tiene dos variables:

x) el ángulo que la cara forme con la horizontal, e

y) la velocidad de variación de este ángulo.

(Se trata de un sistema que tiene en cuenta el momento del cubo). Si éste no salta al descansar la cara sobre la mesa, su campo será parecido al esquematizado en la figura 4/5/1; la estabilidad que posee el cubo cuando se apoya en una cara corresponde en el campo a la convergencia de las líneas de comportamiento hacia el centro.

Podemos representar aproximadamente la tarjeta rectangular en

equilibrio sobre un borde por dos variables, que midan respectivamente los desplazamientos perpendiculares (x) y paralelos (y) al borde inferior. El campo correspondiente se parecerá al que está esbozado

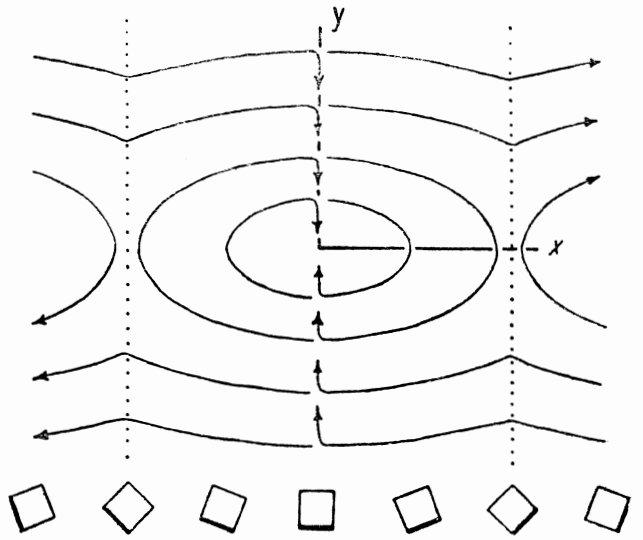


FIGURA 4/5/1. — Campo del sistema de dos variables que se describe en el texto. En la parte inferior se representa el alzado del cubo estando su cara principal (indicada por el trazo grueso) inclinada el ángulo x.

en la figura 4/5/2: a todo desplazamiento del origen O hasta A lo sigue una vuelta del punto representativo a O, retorno que corresponde a la estabilidad; todo desplazamiento de O a B da origen a un alejamiento de la zona que consideramos, distanciamiento que corresponde a la inestabilidad; y lo indeciso de los movimientos en las proximidades de O corresponde a la indecisión que presenta el comportamiento de la tarjeta cuando se la deja abandonada a sí misma en posición vertical.

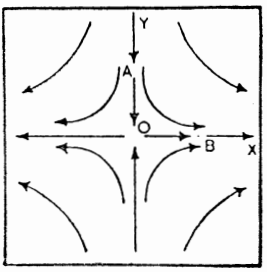


FIGURA 4/5/2.

El regulador de Watt tiene un campo más complicado, pero podemos llegar a una solución aproximada sin dificultades: basta (con aproximación suficiente para nuestros propósitos) especificar el sistema mediante tres variables:

x) velocidad de la máquina y del regulador (en rev./min.),
y) distancia entre contrapesos o posición de la válvula de admisión, y
z) velocidad de admisión del vapor;

(*y* representa cualquiera de las dos magnitudes dichas porque su conexión es enteramente rígida). Si en estas condiciones una perturbación acelera repentinamente la máquina, haciendo que aumente *x*, este aumento producirá otro en *y*, al cual seguirá una disminución de *z*, y luego un decremento de *x*. Como los cambios no se producen por saltos, sino de un modo continuo, la línea de comportamiento se parecerá a la bosquejada en la figura 4/5/3; tomando en consideración lo que ocurriría con otras perturbaciones (cuando las líneas partiesen de puntos distintos de *A*), podrían añadirse al campo dibujado otras líneas de comportamiento; por lo demás, aun iniciándose cada una en un estado diferente, todas convergerían hacia *O*.

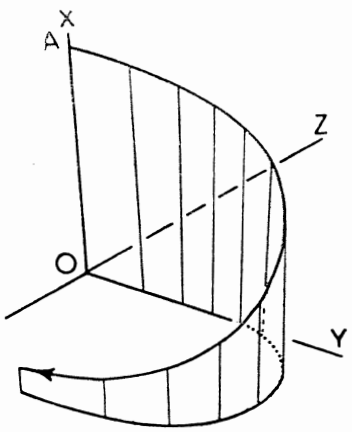


FIGURA 4/5/3. — Una línea de comportamiento del campo del regulador de Watt (para simplificar se ha tomado como origen el estado de régimen); se supone el sistema llevado a *A* y abandonado allí a sí mismo.

4/6. En algunos de nuestros ejemplos —así en el del cubo— las líneas de comportamiento acaban en un punto en el que cesa todo movimiento; en otros casos éste no se anula enteramente; muchos termostatos se estabilizan, al llegar a su estado de régimen, en una pequeña oscilación regular. Pero rara vez nos interesarán los detalles de lo que ocurre en el centro mismo.

4/7. Mucho más importante es el tema subyacente a todos los casos de sistemas estables: el de que éstos se caracterizan porque en ellos podemos *acotar* el movimiento subsiguiente del punto representativo, mientras que en un sistema inestable o bien no es posible fijar tal limitación o depende de hechos ajenos al asunto que se discuta. En efecto, si un termostato se ajusta a 37° C y se lo lleva dllespués a 40° C, podemos predecir que en el futuro el aparato no saldrá de unos límites especificados (que en un aparato determinado pueden ser, digamos, 36 y 40° C); por el contrario, si se monta el termostato con un elemento invertido de modo que se lo transforme en inestable (véase 4/14) y se lo lleva luego a 40° C., no cabe fijar límites a las temperaturas que alcance más tarde — a menos que introduzcamos aspectos tales como el punto de fusión de la soldadura.

4/8. Estas consideraciones nos conducen a las definiciones. Dado un campo de un sistema determinado por estados y una región de aquél, la región es *estable* si las líneas de comportamiento procedentes de todos sus puntos se mantienen dentro de ella misma.

Así, marquemos un punto a cada lado de *A* en la figura 4/3/1 y consideremos que definan una región: todos los puntos representativos situados en su interior van a parar a *A*, y ninguno puede abandonar tal zona, luego ésta constituye un región estable. En cambio, es imposible marcar ninguna región semejante en torno a *B* (salvo que se restrinja a un único punto: *B* mismo).

Esta definición permite ver con claridad que un cambio de campo o de región puede dar origen a un cambio en el resultado de la prueba: en general no podemos decir de un sistema dado que sea estable (o inestable) incondicionalmente. Lo cual era visible en el campo de la figura 4/5/1, y lo mismo ocurre en el de la 4/5/2 (en esta última las regiones confinadas a partes cualesquiera del eje *y* que comprendan el origen son estables, y todas las demás, inestables).

Hemos elegido los ejemplos anteriores para someter a contraste enérgicamente esta definición; otros ejemplos son más sencillos: tal ocurre en el campo del cubo, en el que se pueden trazar muchas fronteras, todas ellas ovales, tales que las regiones comprendidas por ellas sean estables; y también el campo del regulador de Watt es de este tipo.

Diremos que un *campo* es estable si lo es la totalidad de la región que lo llene; y podremos llamar estable al *sistema* al que pertenezca tal campo.

4/9. Hay ocasiones en que las condiciones son todavía más sencillas: cuando el sistema tenga sólo un estado de equilibrio y todas las líneas de comportamiento o converjan sobre él o diverjan de él; en tales casos, podemos indicar hacia dónde van las líneas afirmando simplemente, y sin especificaciones posteriores, que el sistema "es estable" (o que no lo es). Pero semejante aserción sin especificar (esto es, sin referencia a región alguna) sólo describe adecuadamente un sistema en caso de que el campo de éste, o sea, su comportamiento, tenga igual sencillez.

4/10. Si una línea de comportamiento vuelve sobre sí misma, el sistema sigue un ciclo recurrente; si éste está contenido íntegramente en

una región dada y las líneas de comportamiento *conducen* al mismo, es estable.

Los termostatos que, tras corregir los desplazamientos bastos, se estabilizan en una oscilación fija y estacionaria suelen presentar ciclos de esta índole. En tales casos, el campo no muestra una convergencia sobre un punto, sino sobre un ciclo, tal como puede verse, exageradamente, en la figura 4/10/1.

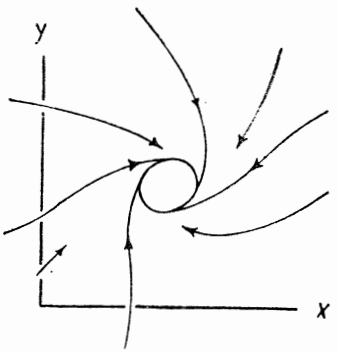
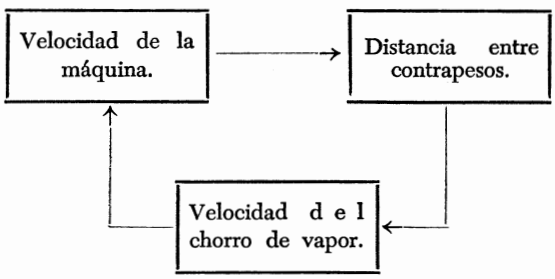


FIGURA 4/10/1.

4/11. Esta definición de estabilidad se sujeta a los requisitos que habíamos impuesto en 2/10, pues el comportamiento observado del sistema determina el campo, y éste determina la estabilidad.

El diagrama de efectos inmediatos

4/12. La descripción hecha en 4/1 del funcionamiento del regulador de Watt hacía ver que este aparato está montado en un circuito funcional: la cadena de causas y efectos vuelve sobre sí misma. Por consiguiente, si representamos "*A* produce un efecto directo sobre *B*" o "*A* perturba directamente a *B*" por el símbolo $A \rightarrow B$, podemos representar la construcción del regulador mencionado mediante el diagrama siguiente:



(El número de variables del diagrama es, en parte, discrecional).

Quiero decir ahora de modo explícito que, cuando se lo define con precisión, este tipo de diagrama puede extraerse *íntegramente de los resultados de operaciones primarias;* no se necesita ninguna clase de conocimientos metafísicos ni recogidos de otros dominios. Para poner de manifiesto cómo se lleva a cabo tal cosa, tomemos como ejemplo un regulador de Watt real.

Se va considerando sucesivamente cada pareja de variables. Supongamos que lo primero que se estudia sea la relación entre "velocidad de la máquina" y "distancia entre contrapesos". Entonces, el experimentador hará que se mantenga fijo el valor de la variable "velocidad del chorro de vapor" y los de todas las demás variables extrañas que podrían interferir en el funcionamiento y obscurecer la relación directa que exista entre la velocidad de la máquina y la distancia entre los contrapesos, permitirá que la máquina marche a diversas velocidades y observará de qué modo los cambios correspondientes afectan al comportamiento de la "distancia entre contrapesos": así averiguará que las variaciones de velocidad de la máquina están seguidas con toda regularidad por variaciones de la distancia dicha, de modo que las transiciones de la variable "distancia entre contrapesos" (el paso de una distancia a otra) *están* afectadas por el valor de la velocidad de la máquina (no es preciso que sepa nada sobre la índole de los enlaces físicos que existan, sino que observe este hecho). Después, conservando todavía constante la "velocidad del chorro de vapor", probará lo que ocurre cuando los contrapesos guarden distancias diversas entre sí, observando el efecto de tales modificaciones sobre la velocidad de la máquina, y hallará que el efecto es nulo. De esta forma habrá asentado la existencia de una flecha de izquierda a derecha, pero no a la inversa, en:

El mismo procedimiento podría aplicarse a la pareja de variables "distancia entre contrapesos" y "velocidad del chorro de vapor" manteniendo constante la otra, esto es, "velocidad de la máquina". Y, finalmente, podrían asentarse las relaciones que haya entre las dos componentes del tercer par de variables.

Es evidente que este método es general: para hallar los efectos inmediatos que se produzcan en un sistema dotado de las variables A, B, C, D..., tómese una pareja de ellas, A y B, digamos; manténganse todas las demás variables (C, D...) en unos valores constantes, y obsérvese el comportamiento de B cuando A parta de A_1, así como el que tenga cuando A parta de A_2; si los dos comportamientos de B son iguales, A no ejerce efecto inmediato sobre B; pero si no lo son, y dependen de un modo regular de cuál sea el valor de partida de A, *existe* un efecto inmediato, que podemos simbolizar con $A \rightarrow B$.

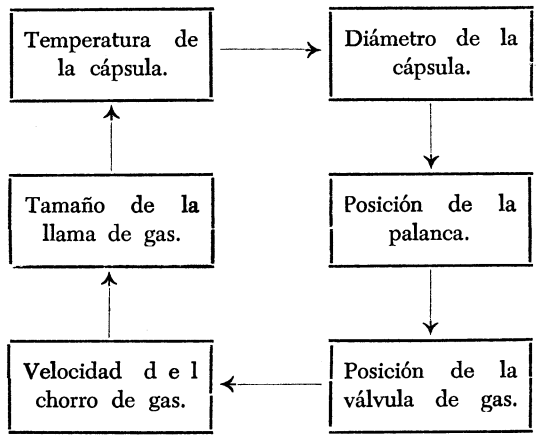
Intercambiando estas dos variables en el proceso podemos someter a contraste la posible existencia de $B \rightarrow A$; y empleando sucesivamente las demás parejas cabe determinar todos los efectos inmediatos. Este proceso consta puramente de operaciones primarias y, por tanto, no hace uso de conocimientos recogidos de otra parte (en 12/3 continuaremos su estudio); hemos de utilizar frecuentemente este **diagrama de efectos inmediatos.**

4/13. Debe advertirse bien que la flecha que hemos empleado, aun cuando a veces corresponda a una unión o "canal" material existente (una varilla, un alambre, una fibra nerviosa, etc.), en sus fundamentos no tiene nada que ver con conexiones materiales, sino que es *una representación de una relación entre los comportamientos de A y de B;* estrictamente hablando, sólo se refiere a *A* y *B*, y no a nada que pueda haber entre ellos.

Con toda claridad se vio, aquel día de 1888 en que Heinrich Hertz llevó a cabo su demostración famosa, que lo decisivo (para decidir si podemos admitir la hipótesis de un canal de comunicación entre *A* y *B*) es la relación funcional, de comportamientos, que exista entre ambas; allí había dos aparatos (a los que podemos llamar *A* y *B*) que notoriamente no tenían entre sí conexión material alguna; y, con todo, cualquiera que fuese el momento, arbitrariamente elegido, en que se cerrase un interruptor en *A*, en el acto saltaba una chispa en *B;* el comportamiento de *B* dependía en todo momento de la posición del interruptor de *A;* había, pues, una contradicción palmaria: materialmente *no* existía conexión alguna entre los dos sistemas y, sin embargo, funcionalmente sus comportamientos *estaban* conectados. Y todos los científicos aceptaron que el testimonio de los *comportamientos* era el definitivo — se había hecho patente cierta vinculación.

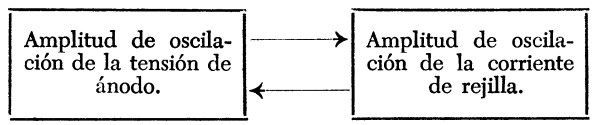
La realimentación

4/14. Un termostato de gas presenta también, funcionalmente, un circuito o realimentación, ya que está mandado por una cápsula que al dilatarse mueve una palanca, la cual, a su vez, regula el chorro de gas que alimente la llama de calefacción; por tanto, el diagrama de efectos inmediatos sería así:



(El lector debe comprobar que cada flecha representa una acción física, que puede ponerse de manifiesto cuando todas las demás variables — esto es, todas excepto la pareja que se estudie — se mantienen constantes.)

La "reacción" de un receptor de radio nos proporciona otro ejemplo. Podemos representar la acción de este tipo mediante dos variables vinculadas en ambos sentidos:



La flecha inferior representa el efecto del potencial de la rejilla de la válvula sobre la corriente del ánodo, y la superior la disposición que tenga el circuito gracias a la cual las fluctuaciones de la corriente de ánodo afectan a dicho potencial; el proyectista de la válvula determina el efecto representado por la flecha de abajo, y el del circuito el representado por la de arriba.

Los sistemas de este género, esto es, aquéllos cuyas variables se afectan mutuamente a lo largo de uno o más circuitos, poseen lo que el ingeniero de telecomunicación llama "realimentación" (o "retroacción"), y a veces se los designa con el nombre de "servomecanismos"; pero por lo menos datan de la fecha del regulador de Watt, y quizá sean todavía más antiguos. Sin embargo, sólo durante la última década * se ha comprendido que una máquina que posea realimentación adquiere po-

* Recuérdese que la primera edición (en inglés) de este libro se escribió en mil novecientos cincuenta y tantos. (*N. del T.*)

tencialidades que le están negadas a las máquinas que carezcan de ella; este avance ocurrió principalmente durante la pasada guerra, fué estimulado por la necesidad de métodos automáticos de mando para proyectores, artillería antiaérea, cohetes y torpedos, y lo facilitaron los grandes progresos que se habían producido en el campo de la electrónica. Como resultado apareció una multitud de máquinas nuevas que actuaban con un poder de autoajuste y corrección desconocido hasta entonces (algunas de cuyas propiedades principales las describiremos en el apartado 4/16).

La naturaleza, grado y polaridad de la realimentación suelen tener un efecto decisivo sobre la estabilidad o inestabilidad del sistema. En el regulador de Watt y en el termostato, por ejemplo, la conexión de una pieza en posición invertida, de modo que invierta la polaridad de la acción de un elemento sobre el siguiente, puede transformar el sistema de estable en inestable (y probablemente lo hará); en el circuito de reacción del receptor de radio, el que exista estabilidad o inestabilidad se encuentra determinado por la relación cuantitativa entre los dos efectos.

En estos sistemas, la inestabilidad se manifiesta por la formación de un "escape"; la menor perturbación queda amplificada al pasar a través del circuito, de modo que crece y crece incesantemente, convirtiéndose en una desviación cada vez mayor a partir del estado central (fenómeno idéntico al que se nombra con la expresión "círculo vicioso").

4/15. Los ejemplos que hemos visto tenían un solo circuito, pero otros sistemas más complejos pueden poseer muchos circuitos entrelazados. Si, por ejemplo, actuasen cuatro variables todas entre sí, como ocurrirá en 8/2, el diagrama de efectos inmediatos sería el que se ve en la figura 4/15/1, *A;* y es fácil comprobar que semejante sistema contiene veinte circuitos entrelazados (de los que se han dibujado dos en la misma figura, *B* y *C*).

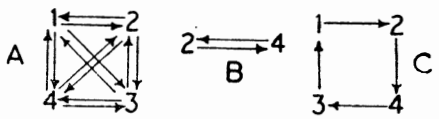


FIGURA 4/15/1.

No es posible desarrollar ulteriormente la teoría de los sistemas con realimentación sin el empleo de recursos matemáticos; pero basta aquí darse cuenta de dos hechos: de que un sistema con realimentación

suele ser o activamente estable o activamente inestable, y de que el que sea una cosa u otra depende de pormenores cuantitativos de la disposición concreta que lo constituya.

La búsqueda de la meta

4/16. Todo sistema estable posee la propiedad de que si se lo aparta de un estado de equilibrio y se lo abandona a sí mismo, el movimiento subsiguiente se amolda tan bien al desplazamiento inicial que el sistema vuelve a aquel estado; *por consiguiente, perturbaciones diversas suscitarán reacciones diversas, amoldadas a ellas.* Para asentar esta afirmación bastará que hagamos referencia a un campo sencillo, como el de la figura 4/15/1.

A este acoplamiento de la línea de retorno al desplazamiento inicial se lo ha mirado, en ocasiones, como "inteligente" y peculiar de los seres vivos; pero el péndulo ordinario nos ofrece una refutación

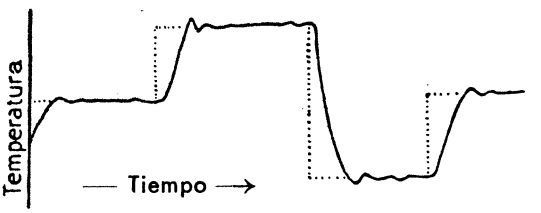


FIGURA 4/16/1. — Trazado de la temperatura de un baño mandado por un termostato (línea continua) y de la correspondiente a la posición del mando (línea de puntos).

muy simple de tal opinión: si lo desplazamos hacia la derecha, desarrolla una fuerza que tiende a moverlo hacia la izquierda, y si lo desplazamos hacia este lado, la fuerza que se origina tiende ha llevarlo hacia el otro. Al advertir que el péndulo reacciona mediante fuerzas que, si bien varían en dirección, apuntan siempre hacia el centro, el hombre de ciencia medieval hubiera dicho que "el péndulo busca el centro", frase con la que habría reconocido que se puede describir el comportamiento de un sistema estable diciendo que "busca su meta". Sin necesidad de introducir implicaciones metafísicas de ninguna clase, podemos reconocer que este tipo de comportamiento aparece en los sistemas dinámicos estables: así, en la figura 4/16/1 se observa que al variar la posición del mando del termostato, la temperatura del aparato sigue siempre la temperatura correspondiente a aquella posición, de modo que ésta (la temperatura prefijada) actúa a modo de meta.

En este caso el movimiento que se produce tiene sólo una dimensión (la temperatura), pero otros dispositivos que busquen su meta pueden emplear más: el proyector mandado por radar, por ejemplo, utiliza los impulsos reflejados para alterar la dirección hacia que apunte, y ello de modo que el ángulo entre tal dirección y la orientación de la fuente de los impulsos reflejados sea mínima; de suerte que si el aparato cambia de ruta el proyector lo seguirá activamente, de igual modo que la temperatura seguía a lo prefijado por la posición del mando. Se trata de un sistema de búsqueda de la meta en dos dimensiones.

Estos ejemplos manifiestan el rasgo común de estar "dirigidos por los errores"; cada uno de ellos está mandado, en parte, por la desviación del estado del sistema a partir del estado de equilibrio (el cual, en tales ejemplos, puede variar en virtud de una acción exterior): el termostato es afectado por la diferencia entre la temperatura real y la prefijada con el mando, mientras que lo que afecta al proyector es la diferencia entre las dos direcciones aludidas. Así pues, *las máquinas dotadas de realimentación no están sujetas al dicho, tan repetido, de que las máquinas tienen que actuar ciegamente y no pueden corregir sus errores* (afirmación que es verdadera en cuanto a máquinas sin realimentación, pero no en cuanto a máquinas en general; cf. el apartado 3/11).

Una vez que se cae en la cuenta de que la realimentación puede utilizarse para corregir cualquier desviación que nos plazca, se comprende fácilmente que la complejidad del comportamiento de búsqueda de su meta que pueda darse en máquinas enteramente desprovistas de todo factor "vital" carece de límites. Así, cabría mandar un cañón antiaéreo automático con los impulsos de radar reflejados, tanto por el aeroplano que constituyese su blanco como por sus propios proyectiles en el momento de explosión, de forma que tendiese a hacer mínima la distancia entre punto de explosión y aparato; semejante sistema, completamente automático, tendría un comportamiento indistinguible del de otro cañón mandado por un hombre; ambos apuntarían al blanco, siguiéndolo en todas sus maniobras y utilizando continuamente sus errores para mejorar el disparo siguiente. Por tanto, es claro que un sistema dotado de realimentación puede al mismo tiempo ser por entero automático y, con todo, buscar su meta de forma activa y compleja: no hay incompatibilidad alguna entre ambas cosas.

4/17. Se habrá observado que la estabilidad, tal y como la hemos definido, no implica en modo alguno fijeza ni rigidez. Es cierto que el sistema estable tiene, por lo general, un estado de equilibrio en el que no presenta cambios; pero la carencia de éstos es muy engañosa si sugiere rigidez: cuando se lo desplace de dicho estado ostentará movimientos activos, acaso de gran amplitud y complejidad. Los sistemas estables están restringidos únicamente por cuanto no presentan las divergencias propias de la inestabilidad, que carecen de toda restricción.

Estabilidad y conjunto

4/18. Un rasgo muy importante de la estabilidad (o inestabilidad) de los sistemas consiste en que *se trata de una propiedad del conjunto del sistema, que no puede asignarse a ninguna de sus partes.* Ilustremos esta afirmación considerando el primer diagrama de 4/14 en cuanto a su relación con la construcción del termostato en la práctica. Con objeto de asegurar la estabilidad del conjunto final, el proyectista ha de tener en cuenta:

1) el efecto de la temperatura sobre el diámetro de la cápsula, esto es, si una elevación de aquélla la hará dilatarse o contraerse;
2) en qué dirección hará moverse a la palanca la expansión de la cápsula;
3) en qué dirección desplazará a la válvula de gas un movimiento dado de la palanca;
4) si un desplazamiento determinado de la válvula de gas hace que aumente, o que disminuya, la velocidad del chorro de gas;
5) si un aumento de esta velocidad origina un aumento o una disminución de la llama del gas, y
6) cómo afectará el tamaño de la llama a la temperatura de la cápsula.

(Algunas respuestas son obvias, pero es preciso incluirlas, de todos modos). Una vez conocidas las respuestas a estas seis cuestiones, la única manera que tiene el proyectista de garantizar la estabilidad es la de disponer los elementos de tal manera (principalmente actuando sobre 2), 3) y 5)) que el conjunto forme la combinación adecuada; de modo que, por muy decididos que estén cinco de estos efectos, la estabilidad dependerá de cómo entre en relación con ellos el

sexto; *la estabilidad pertenece solamente a la combinación o disposición de las partes, y no se la puede referir a éstas consideradas separadamente.*

Vamos a dar otros ejemplos que subrayen que la estabilidad de un sistema es independiente de cualesquiera condiciones propias de las partes que compongan el conjunto. (En los apartados 20/9 y 21/12 se encuentran las demostraciones correspondientes).

a) Se pueden enlazar entre sí dos sistemas de modo que actúen uno sobre otro y formen un sistema único; pero el saber que aquéllos, por separado, eran estables, no es saber nada acerca de la estabilidad del sistema formado por ambos, que lo mismo puede ser estable que inestable.

b) Dos sistemas que sean de por sí inestables pueden enlazarse de suerte que el conjunto de ambos sea estable.

c) Dos sistemas son capaces de constituir un todo estable cuando se los enlace de un modo, e inestable cuando se los enlace de otro.

d) Si en un sistema estable se fija el valor de una variable, el efecto que se produzca puede ser el de convertir el resto en inestable.

Podrían multiplicarse estos ejemplos casi indefinidamente. Todos ellos ilustran la regla de que la estabilidad (o la inestabilidad) de un sistema dinámico depende de las partes y de las relaciones que existan entre ellas al formar el conjunto.

4/19. El hecho de que la estabilidad de un sistema sea una propiedad de éste como un todo guarda relación con el hecho de que *la presencia de la estabilidad implica siempre cierta coordinación de las acciones mutuas entre las partes.* En el termostato la necesidad de coordinación es clara, pues si los distintos elementos se combinasen al azar, las probabilidades de que el conjunto fuese estable estarían equilibradas (con las de que no lo fuese); pero al irse complicando el sistema y las realimentaciones, el lograr la estabilidad se vuelve cada vez más difícil, y la probabilidad de que sea inestable más elevada. Y los ingenieros de radio saben demasiado bien con qué facilidad se convierten en inestables los sistemas complejos dotados de realimentación, y lo difícil que es descubrir precisamente la combinación de elementos y de vinculaciones que proporcione la estabilidad.

En 20/10 trataremos esta cuestión más a fondo; baste advertir aquí que, conforme aumenta el número de variables, normalmente es preciso coordinar los efectos que cada una ejerza sobre las demás con un cuidado creciente para que pueda conseguirse la estabilidad.

La adaptación como estabilidad

5/1. Hasta ahora hemos venido empleando el concepto de "adaptación" sin definirlo; es menester que remediemos esta vaguedad. Pero no solamente la definición ha de ser precisa, sino que, según 2/10, hay que darla en términos que sean íntegramente reductibles a operaciones primarias.

5/2. Podemos rechazar inmediatamente la sugerencia de que el comportamiento de un animal es "adaptativo" si éste "responde correctamente a un estímulo": pues, en primer lugar, presupone una acción debida a un experimentador, y, por ello, no se la puede aplicar cuando el organismo en vida libre y su medio se afecten recíprocamente; y, además, semejante definición no nos proporciona ningún significado de "correctamente", a no ser que quiera decir "de acuerdo con lo que el experimentador crea que el animal debe hacer". Es una definición que no nos vale para nada.

La homeóstasis

5/3. Propongo que definamos que *una forma de comportamiento es* **adaptativa** *si mantiene las variables esenciales* (cf. 3/14) *dentro de los límites fisiológicos.* Una justificación plena de tal definición entrañaría que la comparásemos con todos los hechos conocidos, tarea de longitud imposible; sin embargo, es fundamental en esta cuestión, y tengo que debatirla cuanto sea menester para hacer ver lo fundamental que es y toda la amplitud de su aplicabilidad.

En primer término, bosquejaré los hechos subyacentes al concepto de Cannon de la "homeóstasis", que no son directamente pertinentes para el problema del aprender, ya que sus mecanismos son innatos; pero estos últimos son tan claros y conocidos que nos ofrecen una ilustración básica ideal. Aquellos hechos muestran:

1) que todo mecanismo está "adaptado" a su finalidad;
2) que ésta consiste en mantener los valores de ciertas variables esenciales dentro de ciertos límites fisiológicos, y
3) que la casi totalidad del comportamiento del sistema vegetativo de los animales se debe a tales mecanismos.

5/4. Podemos citar, como primer ejemplo, los mecanismos que tienden a mantener la concentración de glucosa de la sangre dentro de ciertos límites: es preciso que aquélla no descienda por debajo del 0,06 por 100, aproximadamente, pues de otro modo los tejidos quedarían privados de su fuente principal de energía; pero tampoco debe pasar del 0,18 por 100, poco más o menos, si no han de producirse otros efectos indeseables. Si la concentración de glucosa cae a un valor inferior al 0,07 por 100, las glándulas de la médula suprarrenal segregan adrenalina, que obliga al hígado a transformar sus reservas de glucógeno en glucosa; ésta pasa a la sangre, y se contrarresta el descenso. Por el contrario, si la concentración se eleva demasiado, aumenta la secreción de insulina del páncreas, lo cual hace que el hígado extraiga glucosa de la sangre; además, los músculos y la piel la eliminan también, y los riñones colaboran a ello permitiendo que pase glucosa a la orina si la concentración en la sangre excede del 0,18 por 100. He aquí, pues, cinco actividades encaminadas a lograr el mismo efecto: todas ellas actúan de forma que se *restrinjan* las fluctuaciones que de otro modo ocurrirían, y se las puede llamar, por eso, "adaptativas", ya que su actuación protege la vida del animal.

La temperatura interior del cuerpo de los animales de sangre caliente puede sufrir perturbaciones debidas a agotamiento, a enfermedad o al efecto del tiempo a que se encuentren expuestos. Si esta temperatura aumenta, la piel se congestiona y pasa más calor del cuerpo al aire circundante, se forma sudor, con lo que la evaporación del agua elimina calor del cuerpo, y el metabolismo disminuye, de modo que la producción de calor es más pequeña. En caso de que el cuerpo se enfríe, estas modificaciones se invierten: puede empezarse a tiritar, actividad muscular suplementaria que proporciona calor, que calienta el cuerpo; se segrega adrenalina, que eleva el tono muscular y el ritmo metabólico, lo cual aumenta asimismo el calor corporal; los pelos o plumas se erizan, debido a la acción de pequeños músculos de la piel, de suerte que entre sus intersticios queda encerrado más aire y se conserva el calor; y cuando soporta un frío glacial, el ser humano, ya casi inconsciente, adopta de modo reflejo una postura de extrema flexión, con los brazos firmemente apretados contra el pecho y las pier-

nas contraídas sobre el abdomen (postura que, evidentemente, deja expuesta al aire la mínima superficie). Al actuar, pues, de todas estas formas, el cuerpo mantiene su temperatura dentro de ciertos límites.

La cantidad de bióxido de carbono existente en la sangre tiene un efecto muy importante sobre la alcalinidad de ésta. Si aquella cantidad aumenta, se eleva el ritmo respiratorio, y la exhalación del bióxido se produce a mayor velocidad; si disminuye, la reacción se produce en sentido contrario; de este modo la alcalinidad sanguínea se conserva dentro de sus límites.

La retina trabaja óptimamente bajo cierta intensidad de iluminación. Cuando la luminosidad es fuerte el sistema nervioso contrae la pupila, y cuando es débil la dilata: así la cantidad de luz se mantiene entre unos límites.

Si los ojos se exponen de modo permanente a una iluminación elevada, como sucede cuando se va a los trópicos, las células pigmentarias de la retina crecen día por día, hasta que absorben una proporción bastante grande de la luz incidente antes de que alcance a las células sensitivas; y por este procedimiento la iluminación de éstas no excede ciertos límites.

Cuando se las expone a la luz solar, las células de la piel portadoras de pigmento aumentan en número, extensión y contenido pigmentario: estos cambios conservan dentro de unos límites el grado de iluminación de las capas más profundas de la piel.

Al masticar un alimento seco se vierten grandes cantidades de saliva en la boca: este líquido lubrica el alimento y lo transforma de un cuerpo de textura áspera y abrasiva en uno que puede ser masticado sin daños. Por consiguiente, esta secreción mantiene los efectos de la fricción por debajo del nivel destructivo.

Una hemorragia puede alterar el volumen de la circulación sanguínea. En cuanto se produce una fuerte hemorragia, se experimenta una serie de modificaciones: los capilares de las extremidades y de los músculos se contraen, de modo que la sangre pasa de tales vasos a los órganos internos, más esenciales; se sufre una gran sed, lo cual impele al sujeto a conseguir líquidos; algunos fluidos procedentes de los tejidos se introducen en el torrente circulatorio y aumentan su volumen, y la coagulación de la herida ayuda a detener la hemorragia. Esta produce un efecto secundario, ya que al reducir el número de hematíes reduce también la cantidad de oxígeno que cabe transportar a los tejidos, y esta disminución estimula a la médula roja a producir más intensamente glóbulos rojos. Todas estas acciones tienden a conservar

las variables "volumen de sangre en circulación" y "aporte de oxígeno a los tejidos" dentro de sus límites normales.

Todo animal capaz de moverse velozmente está sujeto a chocar con objetos duros. Pero los animales poseen reflejos que tienden a hacer mínimo el albur de colisión y de daños mecánicos: pues los esfuerzos de esta índole causan daños —laceraciones, dislocaciones o fracturas— únicamente si exceden cierto valor determinado, que depende del tejido que lo sufra (de que sea piel, ligamento o hueso); de modo que tales reflejos actúan para mantener los esfuerzos mecánicos dentro de unos límites fisiológicos.

Podríamos presentar otros muchos ejemplos, pero todos ellos pueden incluirse en la misma fórmula: cierta perturbación externa tiende a sacar una variable esencial de sus límites normales, pero el comienzo de la modificación misma activa un mecanismo que *se opone* a aquella perturbación. Mediante este mecanismo se mantiene la variable esencial dentro de unos límites mucho más estrechos de los que aparecerían si no se opusiera nada a ella, y tal estrechamiento es la manifestación objetiva de la adaptación del mecanismo.

5/5. Los mecanismos citados en el apartado anterior actúan principalmente dentro del cuerpo, pero debe advertirse que algunos de ellos obraban en parte a través del medio. En efecto. Si la temperatura corporal sube, el sistema nervioso rebaja la producción de calor dentro del cuerpo y la temperatura de éste disminuye, pero sólo porque cede constantemente calor a su medio: el cuerpo se enfría al congestionarse la piel únicamente si el aire circundante está fresco, y el sudor hace bajar la temperatura nada más que en caso de que este aire no se encuentre saturado; la elevación del ritmo respiratorio disminuye el contenido de bióxido de carbono de la sangre, pero solamente si la atmósfera contiene una cantidad inferior al 5 por 100. En todos estos casos la cadena de causas y efectos pasa parcialmente por el medio; así pues, los mecanismos que operan íntegramente dentro del cuerpo y los que se apoyan ampliamente en el medio no son otra cosa que los extremos de una serie continua. De este modo, un animal sediento quiere agua: si se trata de un pez no tiene más que ingerir, pero si es un antílope en la sabana ha de seguir un complicado proceso de búsqueda, marcha y hallazgo de un camino apropiado que lleve a un río o a una balsa. Por tanto, los mecanismos homeostáticos se extienden desde los que trabajan enteramente en el interior del animal hasta los que involucran sus actividades de máximo alcance, pero *los principios son, dondequiera, uniformes.*

La homeóstasis generalizada

5/6. Para juzgar del comportamiento del animal en libertad en cuanto a las reacciones que haya aprendido puede emplearse exactamente el mismo criterio de "adaptación". Veamos el problema tipo del gatito y el fuego: cuando el animalito se acerca por primera vez a un fuego de chimenea puede darle un zarpazo, como si fuese un ratón, puede agacharse y empezar a "perseguirlo", intentar darle un bufido o no concederle importancia y andar hacia él hasta casi meterse dentro; pero todas estas acciones son capaces de hacer que el gatito resulte quemado. Análogamente, si éste tiene frío puede muy bien sentarse lejos del fuego y seguir pasando frío. No podemos decir que el comportamiento del minino esté adaptado, pues la temperatura de la piel no se le mantiene dentro de los límites normales; dicho de otro modo, el animal no actúa homeostáticamente con respecto a dicha temperatura. Pero veamos, como contraste, el comportamiento del gato experimentado: los días fríos se acerca al fuego a una distancia medida de modo que la piel ni se le caliente en exceso ni se le quede demasiado fría; si el fuego se aviva se separa un poco, hasta que la piel se le caliente de nuevo moderadamente, y si baja se acerca; si se desprende un carbón incandescente, el gato actúa de modo que la piel se le mantenga a una temperatura comprendida entre los límites normales. Sin necesidad de inquisición alguna, en esta etapa, acerca de lo que haya ocurrido en el cerebro del gatito, podemos decir, al menos, que, si bien al principio su comportamiento no era homeostático en lo referente a su temperatura de la piel, ahora sí lo es; y este último comportamiento está "adaptado", es decir, protege la vida del animal al mantener las variables esenciales dentro de unos límites.

La misma tesis puede aplicarse en gran medida, si no enteramente, al comportamiento del adulto humano normal; y para hacer patente su extensa aplicabilidad y que incluso la vida civilizada del hombre no constituye una excepción, vamos a examinar los conocidos efectos físicos y fisiológicos de algunos de los entornos de que se ha provisto a sí mismo, haciendo ver que cada uno de sus elementos estrecha el margen de variación de sus variables esenciales.

Lo primero que necesita el hombre civilizado es una casa, y el primer efecto de ésta es mantener el aire en que viva a una temperatura más igualada; la techumbre le mantiene la piel con un grado de sequedad más constante; si las ventanas se abren en verano y se cierran en

invierno, ayudan a mantener una temperatura siempre igual, y lo mismo hacen las chimeneas y las estufas; los vidrios de las ventanas mantienen la iluminación de las habitaciones cercana al óptimo, y la luz artificial produce idéntico efecto; por fin, los tubos de las chimeneas conservan en las habitaciones la cantidad de humo, tan irritante, cercana a su valor óptimo, que es cero.

No sería nada difícil mostrar cómo muchos otros artefactos de la civilización limitan de modo parecido las variaciones. Sería interminable un intento de hacer patente lo que ocurra en cada uno de ellos, pero con objeto de confirmar nuestra argumentación vamos a parar mientes en un automóvil, elemento por elemento, de modo que hagamos ver su homeostática relación con el hombre.

Al viajar en vehículo, frente a lo que ocurre con el viaje a pie, se mantienen dentro de estrechos límites diversas variables esenciales; la fatiga producida por una larga caminata implica que ciertas variables (que aún no conocemos muy bien) han sobrepasado unos límites que no se cruzan cuando el sujeto es transportado por aquél: las reservas alimenticias del cuerpo estarán menos exhaustas, la piel de las plantas de los pies menos tumefacta, los músculos habrán soportado menos esfuerzo, en invierno el cuerpo no se habrá enfriado tanto y en verano habrá sufrido menos calor de lo que hubiera ocurrido si el sujeto hubiese viajado a pie.

Cuando se examina el automóvil con mayor detenimiento se encuentran muy distintas maneras que tiene de ayudarnos a mantener nuestras variables esenciales dentro de límites muy próximos entre sí: el techo nos mantiene la piel a una sequedad constante, las ventanillas nos protegen del viento si es frío, y cuando se las abre en verano sirven para refrescarnos; las alfombrillas del piso actúan análogamente en el invierno, esto es, nos ayudan a impedir que la temperatura de los pies caiga por debajo de su valor óptimo; los baches de la carretera originan esfuerzos en la piel y en el bastidor óseo humano que se disminuyen notablemente mediante los resortes de la suspensión, y los amortiguadores ejercen un efecto análogo; una colisión causaría una deceleración fortísima, que daría lugar a valores sumamente elevados de los esfuerzos ejercidos sobre la piel y los huesos de los pasajeros, pero los frenos permiten evitar tales valores, de modo que estos últimos elementos mantienen la variable "esfuerzo sobre los huesos" entre límites más estrechos; y unos buenos faros consiguen que la luminosidad de la carretera se conserve dentro de límites más cercanos entre sí de lo que sucedería si no existiesen.

Así pues, vemos que la tesis de que "adaptación" quiere decir

mantenimiento de unas variables esenciales dentro de unos límites fisiológicos no solamente es válida en el caso de las sencillas actividades de animales muy primitivos, sino también cuando se trata de otras mucho más complejas de los organismos "superiores".

5/7. Antes de seguir adelante debe observarse que la palabra "adaptación" suele emplearse en dos sentidos, que se refieren a procesos diferentes.

El mejor modo de hacer visible esta distinción es recordar los mecanismos homeostáticos innatos, por ejemplo, la reacción al frío que consiste en tiritar. Este mecanismo puede sufrir dos tipos de "adaptación": el primero tuvo lugar hace muchísimo tiempo, y consistió en el paso de una especie demasiado primitiva para poseer tal reacción a otra que, por selección natural, la había desarrollado como rasgo característico innato; y el segundo aparece cuando un miembro de la especie, que habrá nacido dotado de dicho mecanismo, experimenta frío y pasa de no tiritar a hacerlo. El primer cambio ha entrañado la formación del mecanismo mismo, en tanto que el segundo tiene lugar cuando se estimula a éste de modo que aparezcan sus propiedades.

En el proceso del aprendizaje se encuentra el primer estadio cuando el animal "aprende", o sea, cuando pasa de ser un animal que no poseía cierto mecanismo adaptador a uno que ya lo tiene, y el segundo, cuando este mecanismo, ya formado, pasa de la inactividad a la actividad. (Trataremos en el capítulo IX de los procesos que llevan a su formación.)

5/8. Podemos ahora reconocer que *comportamiento "adaptativo" equivale a comportamiento de un sistema estable cuya región de estabilidad sea aquella región del espacio de fases en que las variables esenciales se mantengan dentro de sus límites normales.*

Esta tesis no es nueva (aunque hoy pueda enunciársela con mayor precisión):

> "Cada una de las fases de la actividad de un ser vivo no tiene que ser sólo algo que siga necesariamente a algún cambio anterior de su medio, sino que ha de adaptarse a este cambio de tal modo que tienda a su neutralización, y, de esta suerte, a la supervivencia del organismo... Es menester que ello se aplique asimismo a *todas* las relaciones de los seres vivos; tiene que ser, por consiguiente, el principio orientador, no solamente en fisiología... sino también en las

demás ramas de la biología que tratan de las relaciones del animal vivo con su medio y de los factores que determinan su supervivencia en la lucha por la existencia."

(Starling.)

"En un sistema abierto, tal como el representado por nuestros cuerpos, compuesto por materiales inestables y continuamente sujeto a situaciones perturbadoras, la constancia es por sí misma un testimonio de que existen dispositivos que actúan —o están preparados para actuar— con objeto de mantenerla."

(Cannon.)

"Todo sistema material puede existir como una entidad sólo mientras sus fuerzas internas —atracción, cohexión, etc.— equilibren las fuerzas externas que actúen sobre él. Lo cual es verdad para una piedra ordinaria exactamente lo mismo que para las substancias más complejas, y debería reconocerse que también es verdadero para el organismo animal. [Pues] éste, por ser un sistema material definido y circunscrito, sólo puede seguir existiendo en tanto se encuentre en continuo equilibrio con las fuerzas que le son exteriores: tan pronto como se perturbe gravemente este equilibrio, el organismo dejará de existir como la entidad que era."

(Pávlov.)

McDougall no empleó nunca explícitamente el concepto de "estabilidad", pero, al describir el tipo de comportamiento que consideraba ser más característico del organismo vivo, escribía:

"Sáquese una bola de billar de la bolsa y colóquesela sobre la mesa: permanece en reposo, y continuará de este modo durante un tiempo indefinidamente largo si no se le aplica ninguna fuerza. Empújesela en una dirección cualquiera y su movimiento a lo largo de ella persistirá hasta que el impulso se agote, o hasta que la desvíe la resistencia del reborde y siga otra nueva ruta, determinada mecánicamente... Contrapóngase ahora a ello un caso de comportamiento: sáquese de su guarida un animal tímido, tal como el conejillo de Indias, y colóqueselo sobre la hierba; en lugar de permanecer en reposo, corre a esconderse en su madriguera; empújeselo en cualquier otra dirección y, en cuanto se retire la mano, retrocederá corriendo a su guarida; póngase el obstáculo que sea en su camino y tratará de rodearlo o de pasar por encima de él, persistiendo sin descanso hasta que consiga su finalidad o hasta que su energía se haya agotado."

Difícilmente podría haber elegido otro ejemplo que hiciese ver más claramente las marcas distintivas de la estabilidad.

La supervivencia

5/9. ¿Existen aspectos de la "adaptación" que no estén incluídos en la definición de la "estabilidad"? ¿Será acaso la "supervivencia" el solo criterio de la adaptación? ¿Hemos de mantener que el soldado romano que mató a Arquímedes en Siracusa estaba mejor "adaptado" en su comportamiento que Arquímedes?

No se puede responder fácilmente a esta cuestión; pero se trata de una pregunta parecida a aquélla del apartado 3/4 en que nos interrogábamos sobre si es posible representar con números todas las cuali-

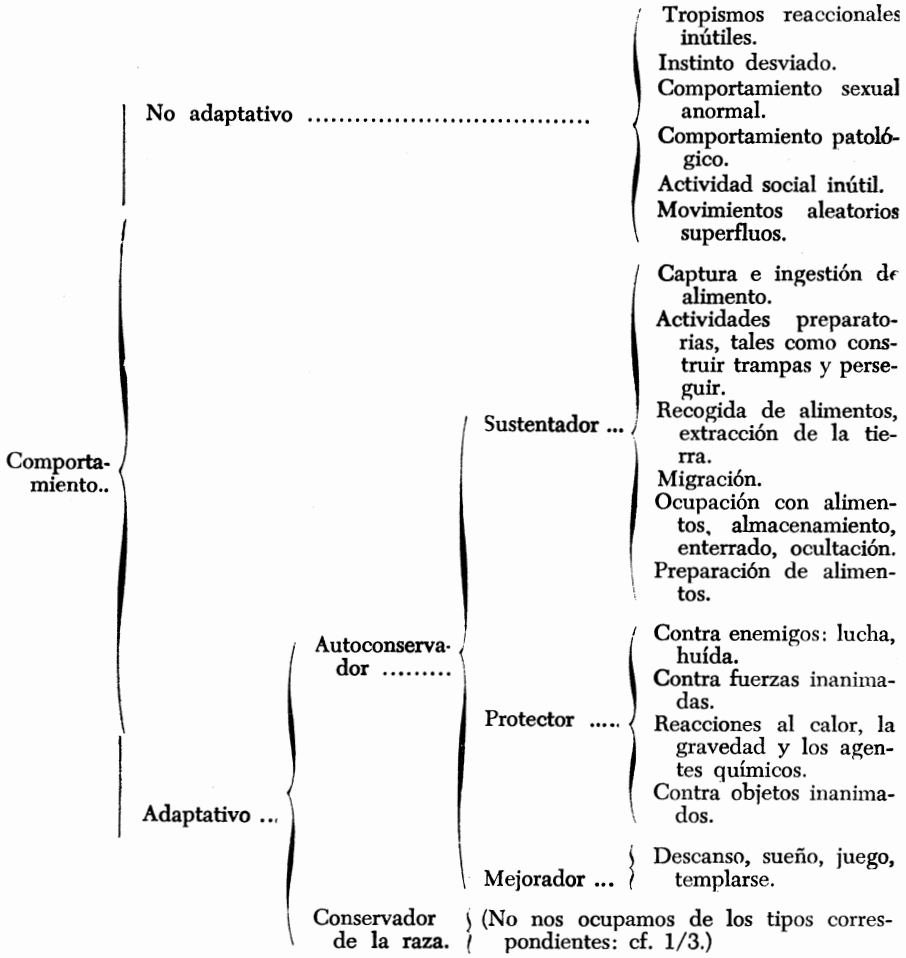


Tabla 5/9/1. — Todas las formas del comportamiento animal, según la clasificación de Holmes.

dades de un organismo vivo, y la respuesta ha de ser semejante a la allí dada. (Supondremos que nos vamos a ocupar primariamente de criaturas simples, en vez de las más complejas, si bien los ejemplos de 5/6 han hecho ver que este criterio permite juzgar adecuadamente al menos acerca de algunas actividades humanas.)

Con objeto de lanzar una rápida ojeada de conjunto sobre los tipos de comportamiento de los animales más primitivos, podemos examinar la clasificación de Holmes, que pretende ser exhaustiva, pero que se ha elaborado de modo independiente del concepto de estabilidad; y el lector podrá evaluar en qué medida nuestra formulación del apartado 5/8 es compatible y coherente con este esquema, que reproducimos en la tabla 5/9/1.

En cuanto a los organismos primitivos, y excluyendo los comportamientos que se refieren a la supervivencia de la especie, parece haber pocas dudas de que la "adaptatividad" del comportamiento se mide adecuadamente por su tendencia a favorecer la supervivencia del organismo.

5/10. Una característica sumamente impresionante de los organismos vivos es su movilidad, su tendencia a cambiar: característica expuesta perfectamente por McDougall en el ejemplo del apartado 5/8. Sin embargo, nuestra formulación transfiere el centro de interés al estado de equilibrio, o sea, al hecho de que las variables esenciales del organismo adaptado cambien *menos* de lo que lo harían si no estuviese adaptado. ¿Qué es lo importante, la constancia o el cambio?

Los dos aspectos no son incompatibles, pues *la constancia de algunas variables puede entrañar una vigorosa actividad de otras.* Un termostato reacciona vigorosamente a una modificación pequeña de la temperatura, de modo que una actividad enérgica de alguna de sus variables mantiene a las demás dentro de límites muy estrechos. Adoptamos aquí el punto de vista de que la constancia de las variables esenciales tiene una importancia fundamental, y de que la actividad de las demás variables sólo importa en cuanto que contribuya a esta finalidad. (Esta cuestión se debate más circunstanciadamente en *I. to C.*, capítulo X.)

Estabilidad y coordinación

5/11. Hasta ahora el estudio ha seguido las relaciones existentes entre los conceptos de "adaptación" y de "estabilidad"; defenderemos

ahora que la "coordinación motriz" guarda, asimismo, una conexión esencial con la estabilidad.

El concepto de "coordinación motriz" se entiende perfectamente en fisiología, en donde se refiere a la capacidad del organismo para combinar las actividades de músculos diversos de suerte que el movimiento resultante siga con precisión el camino apropiado; y en contraposición a él se encuentran los conceptos de torpeza, temblor, ataxia y atetosis. Proponemos que, de acuerdo con nuestros métodos, la presencia o ausencia de coordinación pueda decidirse observando si el movimiento sale o no fuera de unos límites dados.

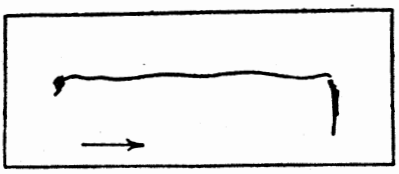


FIGURA 5/11/1.

Esta propuesta parece ser adecuada con tal de que midamos las desviaciones del miembro de que se trate a partir de una línea dada en forma arbitraria (normalmente, gracias al conocimiento de la línea seguida por un miembro normal). Puede verse un primer ejemplo en la figura 5/11/1, que representa la línea trazada por la punta del florete de un esgrimidor experto durante una estocada; cualquier falta de coordinación se hubiese manifestado por una divergencia con respecto a la línea que se pretendía seguir.

La gráfica de la figura 5/11/2 nos proporciona un segundo ejemplo. Se pidió al paciente (un sujeto con un tumor en el hemisferio cerebeloso izquierdo) que siguiera con una pluma las líneas de puntos; las curvas derecha e izquierda están dibujadas con las manos respectivas, y muestran claramente que la coordinación de la mano izquierda es peor que la de la otra. ¿Qué criterio revela este hecho? La distinción esencial es que las desviaciones de las líneas con respecto a los puntos son mayores a la izquierda de la gráfica que a la derecha.

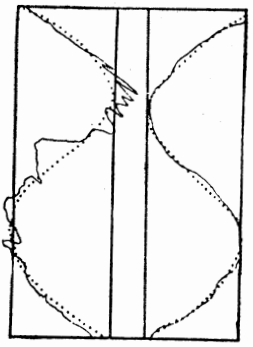


FIGURA 5/11/2. — Gráfica de la tentativa de un paciente de seguir las líneas de puntos con una y otra manos. (Debida a la amabilidad del doctor W. T. Grant, de los Angeles.)

Por consiguiente, el grado de coordinación motriz lograda puede medirse por el tamaño de las desviaciones a partir de cierta línea tipo. Más adelante sustentaremos que hay mecanis-

mos que actúan de tal modo que mantienen unas variables dentro de límites estrechos; luego si se acepta la identificación propuesta en este apartado, semejantes mecanismos podrían considerarse apropiados para coordinar la actividad motriz.

5/12. Lo único que hemos advertido hasta ahora en los sistemas estables es su propiedad de mantener unas variables dentro de ciertos límites; pero también poseen otras propiedades, de las cuales vamos a tener en cuenta dos: éstas se hallan asimismo en animales, y a veces se las considera como prueba de que el organismo tiene cierta capacidad "inteligente" no compartida por los sistemas carentes de vida — pero en estos casos es innecesaria tal posición.

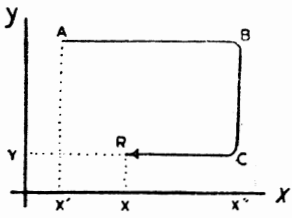


FIGURA 5/12/1.

La primera propiedad la presentan los sistemas estables cuando las líneas de comportamiento no vuelven directamente — en línea recta — al estado de equilibrio (así ocurría, *v. g.*, en la figura 4/5/3). Cuando esto sucede, puede acontecer que observemos que las variables se alejan de sus valores en el estado de equilibrio, para retornar a ellos más tarde. Así, supongamos que el campo de la figura 5/12/1 sea estable y que en el estado de equilibrio (R) x e y tengan los valores respectivos X e Y (hemos dibujado solamente una línea de comportamiento en beneficio de la claridad). Hagamos que el sistema se desplace a A, y observemos su comportamiento subsiguiente: al principio, mientras el punto representativo se mueva hacia B, y apenas cambia, en tanto que x, que había partido de X', pasa por X y llega hasta X''; a partir de este momento x permanece casi constante, e y varía hasta que el punto representativo alcance C; entonces y deja de cambiar de valor y x empieza a variar acercándose a su valor de reposo, X, hasta que lo alcance. En este momento el sistema ha llegado a un estado de equilibrio, y no se producen más cambios. (Esta exposición no hace más que transcribir lingüísticamente lo que el campo define de modo gráfico.)

Ahora bien, la forma y características de todo campo dependen, en definitiva, de la construcción real, física y química, de la "máquina" a partir de la cual se hayan abstraído las variables. El hecho de que la línea de comportamiento no vaya directamente de A a R tiene que ser debido a alguna característica de la "máquina" por la que, en caso de que ésta haya de pasar del primer estado al último, sea necesario recorrer los estados B y C (de modo que si el sistema tenía

partes móviles, sus formas impedirían seguir la ruta directa de *A* a *R*, o si era químico, la prohibición podría ser termodinámica). En cualquier caso, el observador que contemplase su movimiento y la creyera viva podría decir: "¡Qué lista!: *x* no podía pasar directamente de *A* a *R* debido al estorbo que había en su camino, y por ello ha ido a *B;* de este modo *y* ha transportado *x* de *B* a *C*, y, una vez en este último punto, *x* podía ya volver directamente a *R*. Me parece que *x* puede prever las cosas".

Ambos puntos de vista son razonables: lo mismo se puede considerar que los sistemas estables obedecen ciegamente a las leyes de la naturaleza como que tienen la habilidad de volver a su estado de equilibrio pese a los obstáculos que encuentren *.

5/13. En cuanto a la segunda propiedad aludida, es visible en los organismos que reaccionan ante variables con las que no están en contacto directo. Supongamos, por ejemplo, que el diagrama de efectos inmediatos (cf. 4/12) sea el de la figura 5/13/1, en donde las variables están divididas por la línea de puntos en "animal" a la derecha y "medio" a la izquierda, y en el que el animal no se encuentra en contacto directo con la variable indicada con *X*. Suponemos, asimismo, que el sistema es estable, es decir, que ha llegado a unas condiciones "adaptadas" (véase 5/7). Si se lo perturba, las modificaciones que se produzcan harán manifiesta la coordinación entre las partes (apartado 5/12), que se mantendrá en el conjunto del sistema (cf. 4/18); de ello se sigue que el comportamiento de la parte titulada "animal" estará coordinado con el de *X*, aun cuando carezca de contacto inmediato con esta variable. (Véase un ejemplo en 8/7.)

En los organismos superiores, y especialmente en el hombre, la capacidad de reaccionar correctamente a algo no inmediatamente visible ha sido llamada "imaginación", "pensamiento abstracto" y otros diversos nombres cuyo significado preciso no necesitamos discutir en este momento. Lo único que debemos advertir es que la coordinación del comportamiento de una parte con el de otra que no esté en contacto

---

* Me complace reconocer que G. Sommerhoff ha llegado de modo independiente a gran parte de lo que describo aquí. Encontré su *Analytical Biology* cuando corregía las pruebas de la primera edición [inglesa] de *Proyecto para un cerebro,* y lo único que pude hacer fué añadir su título a la lista de referencias bibliográficas. Luego se ha visto que nuestros trabajos se desarrollaban en forma paralela, pues existe una profunda semejanza de perspectiva y de método entre ambos libros. El lector superficial podrá advertir algunas diferencias y pensar que opinamos en forma opuesta, pero estoy seguro de que las discrepancias se refieren solamente a cuestiones secundarias, de definiciones o de subrayar esto o lo otro; y el lector que quiera penetrar más en estos puntos puede consultar dicha obra como una valiosa aportación independiente.

directo con ella es simplemente una propiedad elemental de los sistemas estables.

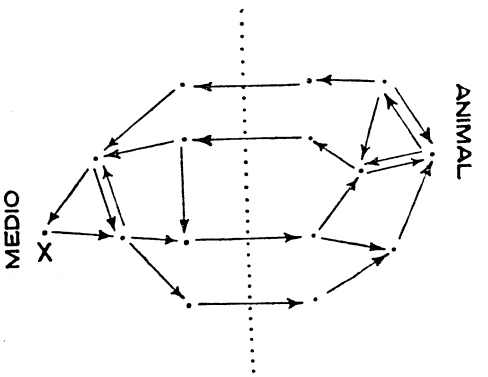


FIGURA 5/13/1.

5/14. Planteemos otra vez nuestro problema con el nuevo vocabulario. Si, por mor de la brevedad, omitimos matices y salvedades de poca importancia, podemos enunciarlo como sigue: ciertas "máquinas" pasan de una forma que da lugar a un comportamiento caótico e inadaptado a otra en la que las partes están coordinadas de modo que el sistema sea estable, esto es, en la que actúan de suerte que se mantengan sus variables esenciales dentro de ciertos límites; ¿cómo puede ocurrir tal cosa? Por ejemplo: ¿qué clase de termostato podría, si se lo montase al azar, colocar de nuevo sus piezas de manera que llegara a ser estable para la temperatura?

Adviértase que el nuevo enunciado entraña el concepto de una máquina que modifique su organización interna; hasta ahora no habíamos dicho nada de este importante concepto, y por ello nos ocuparemos de él en el próximo capítulo.

Los parámetros

6/1. Hasta el momento hemos estudiado los cambios que experimentan las variables de los sistemas determinados por estados, pasando por alto el hecho de que todas estas modificaciones se produzcan sobre un trasfondo —o unos cimientos— de constancias. Así ocurre que, según sabemos (apartado 2/15), un péndulo simple concreto nos proporciona dos variables que permiten predecir correctamente el comportamiento ulterior del sistema en cuanto conozcamos un estado determinado de él; mas lo que no hemos explicado es que ello es verdad mientras la longitud del hilo permanezca constante. Tenemos que prestar atención ahora al trasfondo, a tales constancias.

Todo sistema se constituye por selección de ciertas variables entre todas las que podrían serlo: "formar un sistema" quiere decir que se dividen las variables del universo en dos clases, las de dentro del sistema y las de fuera de él. Estos dos tipos no son diferentes en cuanto a su naturaleza intrínseca, en modo alguno, pero sus relaciones con el sistema son muy distintas.

6/2. *Dado un sistema, toda variable no incluída en él es un* **parámetro** (de ahora en adelante reservaremos el nombre de *variable* para las interiores al sistema).

En general, dado un sistema, los parámetros diferirán en cuanto a la mayor o menor cercanía de sus relaciones con él; algunos guardarán relaciones directas, y las modificaciones de su valor afectarán decisivamente al sistema, como ocurre con el parámetro "longitud del péndulo" en relación con el sistema de dos variables a que hemos aludido en el apartado anterior; otros tendrán una vinculación más lejana, de modo de los cambios que experimenten produzcan solamente leves efectos, según ocurre con el parámetro "viscosidad del aire" en relación con el mismo sistema; y, finalmente, para ser completos, podemos mencionar el infinito número de parámetros sin efecto apreciable; así, el que la luz que ilumine al péndulo sea más o menos viva, los acontecimientos que se produzcan en una habitación adyacente o los acae-

cidos en las nebulosas más distantes. Podemos dejar de lado los parámetros carentes de efecto apreciable, pero es menester que comprendamos claramente las relaciones entre los parámetros efectivos y el sistema.

Dado un sistema, estos últimos parámetros son, por lo regular, innumerables, de modo que la lista de ellos está limitada únicamente por la imaginación del autor. En el caso de los que podrían afectar al comportamiento del repetido sistema de dos variables, tenemos:

1) la longitud del péndulo (que habíamos supuesto, hasta ahora, constante),
2) la velocidad lateral del aire (supuesta constantemente igual a cero hasta este momento),
3) la viscosidad del medio circundante (constante, en la asunción que veníamos haciendo),
4) el movimiento del punto de suspensión, si es que tiene alguno,
5) la fuerza de la gravedad,
6) el campo magnético dentro del cual oscile,
7) el coeficiente de elasticidad del hilo,
8) la carga electrostática del péndulo y las de los cuerpos cercanos,

y así sucesivamente, porque la enumeración no tiene fin.

Parámetro y campo

6/3. Vamos a ver ahora el efecto que produce el cambio de valor de un parámetro en un sistema determinado por estados. La tabla 6/3/1 presenta los resultados de veinticuatro operaciones primarias aplicadas al mismo sistema de dos variables: x es la desviación angular con respecto a la vertical, en grados, y es la velocidad angular, en grados por segundo, y el tiempo se da en segundos.

Las filas 1 y 2 hacen ver que las líneas de comportamiento que siguen al estado $x = 14$, $y = 129$ son iguales, o sea, que el sistema está determinado por estados, al menos en cuanto a los ensayos realizados; y el comportamiento correspondiente está dibujado en línea llena en la figura 6/3/1 (para una longitud del péndulo de 40 cm). Se hizo luego cambiar el parámetro a 60 cm y se observaron otras dos líneas de comportamiento; éstas se confunden a partir del estado $x = 21$,

Longitud en cm	Línea	Variable	Tiempo						
			0	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
40	1	x	0	7	14	20	25	28	29
		y	147	142	129	108	80	48	12
	2	x	14	20	25	28	29	29	27
		y	129	108	80	48	12	— 24	— 58
60	3	x	0	7	14	21	26	31	34
		y	147	144	135	121	101	78	51
	4	x	21	26	31	34	36	36	35
		y	121	101	78	51	23	— 6	— 36

TABLA 6/3/11.

$y = 121$, de modo que el sistema está también ahora determinado por estados, y tiene cierta línea de comportamiento, que hemos trazado de puntos en la misma figura. Mas el cambio de valor del parámetro ha hecho que sean distintas la línea inicial y esta última, que pasan ambas por $x = 0, y = 147$.

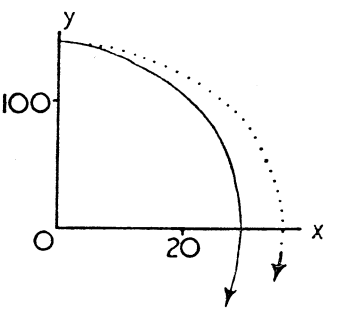


FIGURA 6/3/1.

Por consiguiente, la relación que existe entre el parámetro y las dos variables es como sigue:

1) Mientras el parámetro permanezca constante, el sistema formado por x e y está determinado por estados y posee un campo definido.

2) Cuando el parámetro pasa de un valor constante a otro, el sistema de tales variables vuelve a estar determinado por estados y a tener un campo definido, pero este nuevo campo no es idéntico al anterior.

Esta relación es general: el cambio de valor de un parámetro efectivo modifica la línea de comportamiento correspondiente a cada estado; y de aquí se sigue inmediatamente que *el cambio de valor de un parámetro efectivo hace que cambie el campo.*

En consecuencia, tenemos la importante relación cuantitativa siguiente: un sistema puede presentar, en general, tantos campos como combinaciones de valores puedan tener sus parámetros.

6/4. Apenas cabe sobreestimar la importancia de distinguir bien entre cambio de una variable y cambio de un parámetro, es decir, entre cambios de estado y de campo. La distinción entre ambas cosas nos permitirá evitar la confusión, que nos amenazaba en el apartado 2/1, entre las modificaciones que *constituyen* un comportamiento y las que se encuentran al pasar de un comportamiento a otro. Voy a exponer algunos ejemplos para que la distinción quede bien clara.

En un reloj en marcha, la variable única definida por lo que indique el minutero en su esfera forma un sistema de una variable y determinado por estados, pues, tras algunas observaciones de cómo se comporte, podemos predecir la línea de comportamiento que seguirá a un estado cualquiera dado Si ahora se mueve el regulador (el parámetro) haciéndolo pasar a una nueva posición, de suerte que el reloj marche a distinta velocidad, y se examina de nuevo el sistema, se observará que sigue estando determinado por estados, pero que tiene un campo diferente que antes.

Si una persona sana bebe 100 g de glucosa disueltos en agua, la cantidad de este compuesto de la sangre le ascenderá y descenderá, por lo regular, describiendo la curva *A* de la figura 6/4/1: la variable "glu-

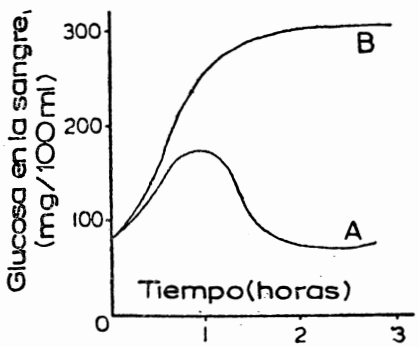


FIGURA 6/4/1. — Cambios del contenido de glucosa de la sangre después de la ingestión de 100 gr. de glucosa; *A*) en una persona normal y *B*) en un diabético.

cosa en la sangre" sola no está determinada por estados, ya que un estado dado (por ejemplo, 120 mg/100 ml) no define el comportamiento subsiguiente (en el que la glucosa de la sangre puede subir o bajar); pero si añadimos una segunda variable, tal como "velocidad de variación del contenido de glucosa de la sangre" (que puede ser tanto positiva como negativa), llegamos a un sistema de dos variables, que para nuestros propósitos de ejemplificación puede considerarse determinado por estados, y cuyo campo se parece al *A* de la figura 6/4/2. En cambio,

si el sujeto es un diabético, la curva representativa de la glucosa en sangre se elevará mucho más (incluso si se parte del mismo valor inicial), según puede verse en la línea *B* de la figura 6/4/1; y cuando se dibuja el campo correspondiente (fig. 6/4/2, *B*), puede advertirse que es diferente del correspondiente a un sujeto normal. Así pues, el cambio de valor del parámetro "grado de la diabetes existente" ha hecho que cambie el campo.

Girden y Culler consiguieron que un perro bajo los efectos del cu-

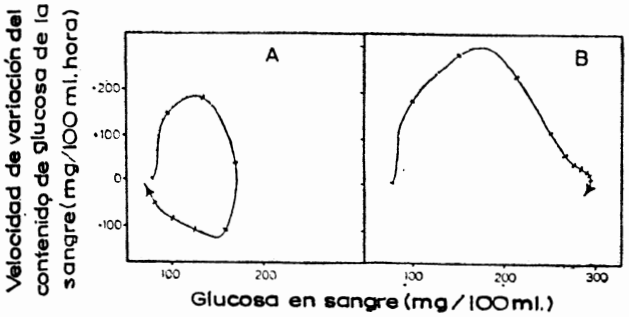


FIGURA 6/4/2. — Campos correspondientes a las líneas de comportamiento *A* y *B* de la figura 6/4/1. Los trazos transversales marcan cada cuarto de hora.

rare (un alcaloide paralizador) adquiriese una respuesta condicionada; cuando el animal se encontró de nuevo en condiciones normales no se pudo elicitar tal respuesta, pero el someterlo otra vez al curare la respuesta condicionada reapareció. Por consiguiente, había dos líneas de comportamiento características (dos respuestas al estímulo): una aparecía cuando el parámetro "concentración de curare en los tejidos" tenía un valor elevado, y la otra cuando su valor era bajo.

Los estímulos

6/5. Dado que muchos estímulos pueden representarse de modo adecuado como un cambio experimentado por el valor de un parámetro, es conveniente que relacionemos con nuestros métodos el concepto fisiológico y el psicológico de "estímulo".

El diagrama de efectos inmediatos es siempre el siguiente:

(experimentador) → estimulador → animal → aparatos registradores.

En algunos casos se somete al animal, que se encontraba en un estado de equilibrio, a un cambio de valor brusco de un estimulador, y se mantiene el valor alcanzado durante el período de observación.

Así, para hacer patente la reacción pupilar a la luz se espera primero a que los ojos se acostumbren a una intensidad de iluminación reducida, y luego se aumenta de repente ésta a un nivel bastante elevado, que se mantiene a todo lo largo de la reacción. En estos casos el estimulador es un parámetro para el sistema "animal y aparatos registradores", y la comparación que hace el fisiólogo entre el comportamiento testigo (previo) y el posterior a la estimulación equivale, en nuestro método, a una comparación entre las dos líneas de comportamiento que, partiendo del mismo estado inicial, se muevan en los dos campos distintos debidos a los dos valores del estimulador: en este tipo de ensayos el estimulador se comporta como una función escalonada (véase 7/13).

Hay veces en que el parámetro cambia repentinamente y vuelve en seguida a su valor inicial, como cuando el experimentador golpea un tendón. Entonces, el efecto producido por la alteración del parámetro es un breve cambio de campo que, mientras dure, aleja el punto representativo de su posición originaria; cuando el parámetro vuelve a su valor primero reaparecen el campo inicial y el estado de equilibrio, pero aquel punto no corresponde ahora a este estado, y se mueve a lo largo de una línea de comportamiento: el organismo "responde" (lo corriente es que vuelva al estado de equilibrio de que partió, pero si hay más de uno puede pasar a un estado de equilibrio distinto). Llamaremos **impulsores** a los estímulos de esta clase.

Es menester que más adelante seamos más precisos acerca de lo que queremos decir con "el" estímulo. Pensemos, por ejemplo, en un perro que adquiera un reflejo condicionado al sonido de un timbre eléctrico; ¿cuál es, exactamente, el estímulo?: ¿el cierre de los contactos del interruptor?; ¿el golpeteo intermitente del macito sobre la campana?; ¿las vibraciones del aire?; ¿las vibraciones del tímpano, de los huesecillos o de la membrana basilar?; ¿los impulsos del nervio acústico, o los de la corteza del lóbulo temporal? Si queremos hablar con alguna precisión hemos de reconocer que el experimentador manda sólo el interruptor, y que éste actúa como un parámetro del sistema formado por el timbre eléctrico, el oído medio, etc., que funciona de modo muy complicado.

Cuando el "estímulo" se hace más complejo, hemos de generalizar. Una generalización aumenta el número de parámetros susceptibles de alteración, como ocurre cuando se somete un perro condicionado a combinaciones formadas por el tictac de un metrónomo, olor de alcanfor, un contacto en el lomo y un destello luminoso. En tales ocasiones hemos de darnos cuenta de que si los parámetros no son ente-

ramente independientes, sino que varían por grupos, como las variables del apartado 3/3, podemos representar cada grupo, sin analizarlo, por un solo valor, y eliminar de esta forma el empleo innecesario de gran número de parámetros.

Enlace de sistemas dinámicos

6/6. Podemos ahora aclarar lo que esencialmente se quiere decir con el concepto de "enlace" de dos (o más) sistemas.

Este concepto tiene la máxima importancia en biología, en donde aparece frecuentemente y de modo muy destacado —se presenta siempre que consideramos que un sistema tiene un efecto sobre otro, comunica con él, lo fuerza o le sirve de señal.

(La naturaleza exacta de la operación de enlace adquiere toda la claridad posible cuando se la expone en forma matemática (véase 21/9), pues entonces puede verse lo que es esencial y lo que carece de importancia. Nos hemos ocupado de ella detalladamente en *I. to C.*, apartado 4/6; aquí la estudiaremos de modo menos riguroso.)

Para enlazar dos sistemas, *A* y *B*, digamos, de forma que *A* afecte a *B*, es preciso que aquél afecte a las condiciones de éste; dicho de otro modo, es preciso que los valores de algunos de los parámetros de *B* (acaso de uno sólo) se conviertan en funciones de los valores de las variables de *A* (esto es, que dependan de estos valores). Así, en caso de que *B* sea un huevo desarrollándose en una incubadora y *A* la altura barométrica, *A* podría quedar "enlazado" de modo que afectase a *B* si hiciéramos que la temperatura (u otro parámetro apropiado) se volviese sensible a la presión.

En este ejemplo no existe ninguna forma obvia de hacer que el desarrollo del huevo afecte a la altura barométrica, por lo cual es difícil que pudiera llevarse a cabo el enlace de *B* con *A*; pero en la mayoría de los casos cabe enlazar en ambas direcciones, y cuando se efectúa este doble enlace se dispone una realimentación entre los dos sistemas.

En casos muy sencillos es posible alcanzar paso a paso, mediante deducciones lógicas o matemáticas, el comportamiento del conjunto formado enlazando diversas partes: a cada una de éstas se le puede atribuir un espacio de fases, ocupado por un campo, que dependerá de la posición del punto representativo de la otra parte o elemento; cada punto representativo experimenta ahora una transición, guiada por su propio campo, cuya forma depende de la posición del otro;

y de esta suerte, paso a paso, cada elemento avanza guiado por el otro y, a la vez, guiándolo a él (este proceso se ha descrito pormenorizadamente en *I. to C.*, 4/7).

Este modo de averiguar lo que ocurra es demasiado complicado para que podamos imaginar cómo se comportarán en la realidad los dos sistemas; es preciso que lleguemos a los pormenores mediante algún otro método. Lo que sí tiene gran importancia es que la naturaleza de este proceso está libre, desde un punto de vista conceptual, de toda vaguedad o ambigüedad, por lo cual puede incluírselo en una teoría rigurosa de los sistemas dinámicos.

Parámetros y estabilidad

6/7. Llegamos ahora al punto principal del capítulo. Puesto que un cambio de valor del parámetro cambia el campo, y puesto que la estabilidad del sistema depende de éste, en general, *un cambio de valor del parámetro hace cambiar de algún modo la estabilidad del sistema.*

Tenemos un ejemplo sencillo al considerar una mezcla de hidrógeno, nitrógeno y amoníaco, que se combinan o disocian hasta que las concentraciones lleguen al estado de equilibrio. Si la mezcla estaba formado inicialmente por amoníaco puro, la variable única "tanto por ciento disociado" constituye un sistema determinado por estados de una variable, que tiene, entre otros parámetros, la temperatura y la presión (como es sabido, los cambios que se produzcan en estos parámetros afectan al estado de equilibrio).

Semejante sistema es muy sencillo, y responde a las modificaciones que sufran los parámetros con un simple desplazamiento del equilibrio; pero estas limitaciones no se encuentran de modo general: un cambio de valor de un parámetro puede dar lugar a cualquier cambio que pueda originarse por reemplazamiento de un campo por otro, de suerte que los sistemas estables pueden convertirse en inestables, los estados de equilibrio cambiar de posición, un estado de equilibrio único puede hacerse múltiple o bien transformarse en un ciclo, etc. Véase un ejemplo en la figura 21/8/1.

Lo único que necesitamos ahora es la relación entre las dos cosas, que es recíproca: en los sistemas determinados por estados, *un cambio de estabilidad sólo puede ser debido a un cambio de valor de un parámetro,* y *el cambio de valor de un parámetro origina un cambio de la estabilidad.*

Equilibrios de parte y todo.

6/8. En general, como hemos visto en 4/18, la relación existente entre las estabilidades de las partes y la del todo puede ser muy compleja, y puede muy bien exigir métodos especiales para su estudio. Hay, sin embargo, una relación sumamente sencilla, que nos será de gran utilidad y que cabe describir fácilmente.

Supongamos que enlazamos la parte *A*, dotada de las variables *u* y *v*, con la *B*, cuyas variables son *w*, *x* e *y*; si las primeras tienen los valores respectivos 7 y 2, y las de *B* los 3, 1 y 5, es evidente que el todo constituye un sistema de cinco variables (*u*, *v*, *w*, *x* e *y*), y que en el estado correspondiente a los indicados tendrá los valores 7, 2, 3, 1 y 5, respectivamente.

Admitamos ahora que este estado (7, 2, 3, 1, 5) del conjunto total sea un estado de equilibrio del mismo; ello implica que la transición que procede de él lleva a él mismo (apartado 4/4), lo cual, a su vez, implica que *A*, cuyos parámetros tienen los valores 3, 1 y 5, pase de (7, 2) a (7, 2), es decir, no cambie. Por consiguiente, el que el todo se encuentre en un estado de equilibrio en (7, 2, 3, 1, 5) entraña que cuando *A* se halle en (7, 2) y tenga como valores de sus parámetros los (3, 1, 5), haya de encontrarse en un estado de equilibrio; y, análogamente, que cuando los parámetros de *B* sean (7, 2), tenga que estar en un estado de equilibrio en (3, 1, 5). Luego el que el conjunto se halle en un estado de equilibrio implica que cada parte se encuentre en un estado de equilibrio en las condiciones constituídas (como parámetros suyos) por las demás partes.

A la inversa, supongamos que *A* esté en equilibrio en el estado (7, 2), teniendo sus parámetros los valores (3, 1, 5), y que *B* se encuentre también en equilibrio en el estado (3, 1, 5) mientras sus parámetros tienen los (7, 2); de ello se sigue que el todo tendrá un estado de equilibrio en el estado (7, 2, 3, 1, 5), pues en tal situación ni *A* ni *B* pueden cambiar.

Resumiendo: *para que un sistema dinámico conjunto se halle en equilibrio en un estado determinado, es necesario y suficiente que cada una de sus partes se encuentre en equilibrio en tal estado y en las condiciones que en el mismo constituyan para ella las demás partes.*

6/9. Supongamos ahora que un conjunto formado por enlace de partes se mueva a lo largo de una línea de comportamiento, y que ésta llegue a un estado que sea de equilibrio para una parte (en las condiciones constituídas en tal momento por las demás), pero no para

éstas. La parte en equilibrio se detendrá momentáneamente, pero las otras, que no habrán alcanzado el suyo propio, modificarán sus estados y, por tanto, modificarán las condiciones a que esté sujeta la parte en equilibrio; ahora bien, como lo corriente es que el cambio de condiciones (o sea, de valores de los parámetros) convierta el estado de equilibrio en otro que ya no tenga esta propiedad, por lo regular la parte que se había detenido empezará a moverse de nuevo.

Es evidente que, en cualquier estado del conjunto, si una parte individual no se encuentra en equilibrio (aun cuando el resto de ellas lo estén), experimentará cambios, dará lugar a unas condiciones distintas para las otras partes, hará, pues, que éstas se vuelvan a mover, e impedirá de este modo que aquel estado lo sea de equilibrio para el conjunto. Como el equilibrio del todo requiere que *todas* las partes se encuentren en él, podemos decir (metafóricamente) que toda parte tiene *derecho de veto* sobre los estados de equilibrio del todo.

6/10. Ahora se puede ya señalar la importancia de este hecho: gracias a él, cada una de las partes actúa *selectivamente* frente al conjunto de equilibrios posibles del todo. Ahora bien, desde el capítulo I venimos buscando un factor que sea, a la vez, de carácter mecanístico y selectivo; en el próximo capítulo veremos cómo actúa este factor.

El sistema ultraestable

7/1. Hemos reunido ya los conceptos necesarios, que hemos definido, en todos los casos, como relaciones entre operaciones primarias, de forma que son completamente objetivos y se sujetan a los requisitos fundamentales de 2/10. Ya es posible volver a tomar en consideracióncón el problema básico del apartado 5/14, y estudiar qué es lo que está entrañado por el hecho de que el gatito pase de tener un mecanismo cerebral que da origen a un comportamiento inadaptado a otro causante de uno adaptado.

Implicaciones de la adaptación

7/2. De acuerdo con 3/11, hay que considerar el gatito y el medio en interacción, de modo que el diagrama de efectos inmediatos tendrá el aspecto presentado por la figura 7/2/1 (diagrama que se parece al de la figura 5/13/1, con la única diferencia de que aquí se representa por un sombreado la fina red de vinculaciones existentes en el medio y en *R*). La flecha que sale de *R* y la que acaba en esta parte representan, naturalmente, los canales motor y sensorial; esta parte misma pertenece al organismo, pero está definida aquí de manera exclusivamente funcional: en este estadio es menester mucha precaución antes de pretender una identificación de *R* con cualesquiera estructuras anatómicas o histológicas, pues se la define como el sistema que actúa cuando el minino reacciona frente al fuego —o sea, la parte responsable del comportamiento manifiesto.

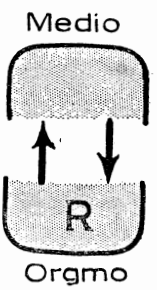


FIGURA 7/2/11.

En el apartado 5/14 indicamos asimismo que el gatito dispone de una gran variedad de reacciones posibles, unas malas y otros buenas; variedad que implica, en virtud de 6/3, que algunos parámetros (lla-

mémoslos S) tienen una variedad de valores, esto es, no han sido fijados enteramente. Como la acción primaria que tienen estos parámetros es la de afectar al comportamiento del animalito (y sólo mediatamente al del medio) es evidente que poseen un efecto inmediato sobre *R*, pero no sobre el medio; así pues, llegamos a la figura 7/2/2. Teniendo en cuenta lo dicho en el apartado 6/3, sabemos que el número posible de valores de *S* distintos tiene que ser igual o mayor que el de modos diferentes de comportarse (tanto adaptados como no adaptados) que pueda tener *R*.

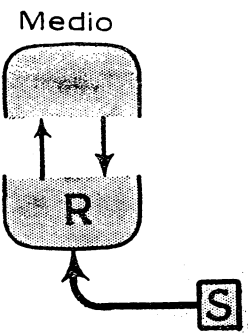


FIGURA 7/2/2.

7/3. Es preciso introducir ahora las variables esenciales. ¿Qué les afectará? Es evidente que tienen que estar afectadas por algo, pues no nos interesa el caso de que el organismo sea inmortal debido a no haber nada que lo amenace; tenemos, entonces, tres posibilidades: que les afecte el medio, *R* o ambas cosas.

El caso de mayor interés es aquél en que lo único que les afecta es el medio; y en tal caso el problema que se le presenta al gatito adquiere toda la aspereza y todo el realismo posible. Así ocurre cuando se desprende una brasa del fuego y rueda hacia él: el medio amaga con un efecto directo sobre las variables esenciales, ya que si el cerebro del animalito no hace nada, éste resultará quemado; también se presenta este caso cuando un animal se va deshidratando en el desierto por el calor: si no hace nada, perecerá de sed.

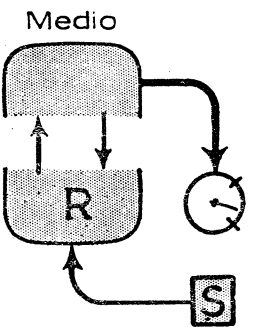


FIGURA 7/3/1.

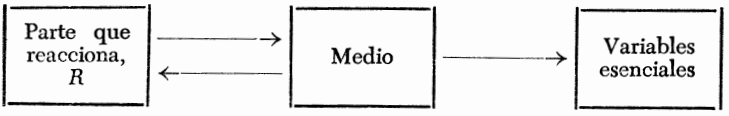
Un efecto inmediato de *R* sobre las variables esenciales sería apropiado únicamente si el cerebro de la cría pudiese hacer que pasase de ser un organismo que no tiene que quemarse a otro al que las quemaduras fuesen beneficiosas (!). (Este cambio de meta puede tener importancia en el funcionamiento superior del sistema nervioso, en el que puede fijarse o modificarse provisionalmente una submeta; pero ello no ocurre al fundamental nivel que estamos ahora considerando, por lo cual no nos volveremos a ocupar de esta cuestión).

Ahora el diagrama de efectos inmediatos tiene la forma que puede verse en la figura 7/3/1, en la que hemos representado colectivamente

las variables esenciales mediante una esfera con su aguja indicadora, para que quede bien claro que lo que importa en cuanto a estas variables es que su valor se encuentre o no dentro de unos límites fisiológicos.

7/4. Continuemos estudiando el caso que ofrece la máxima dificultad al gatito, y veamos ahora lo que ocurre cuando la parte que reacciona, *R*, no sabe qué efectos producen en las variables esenciales los distintos estados del medio (aun cuando estos efectos sean definidos). Así sucede cuando un pájaro arrastrado a una isla desconocida para él encuentra un fruto desconocido, que no sabe si es venenoso o no; igualmente le acontece al gato colocado en una caja de Thorndike, pues no sabe si es preciso empujar la palanca hacia la derecha o hacia la izquierda para que se abra la puerta. De la misma asunción habíamos partido en 1/17, en donde hablábamos del gatito frente al fuego, como ejemplo de organismo que se encuentra en una situación tal, que la experiencia adquirida hasta el momento no le proporciona indicación alguna acerca de la correspondencia entre los distintos estados del medio y los estados caracterizados por encontrarse "dentro" o "fuera" de los límites fisiológicos de la variables esenciales.

Para que el organismo esté adaptado, es menester que, guiado por la información procedente del medio, regule sus variables esenciales, obligándolas a mantenerse dentro de los límites oportunos, mediante unas manipulaciones tales del medio (conseguidas en virtud de su dominio motórico sobre él) que éste actúe sobre aquellas variables del modo apropiado. Por tanto, el diagrama de efectos inmediatos de este proceso es el siguiente:



En el caso que estamos considerando, la parte que reacciona, *R*, no está acomodada o ajustada especialmente a lo que haya en el medio y a la manera en que esto se encuentre enlazado con las variables esenciales; por consiguiente, podemos tomarla como un organismo que trata de regular la salida de un *elemento opaco [Black Box]* (el medio) cuyo contenido le es desconocido.

Cualquiera que sea el elemento opaco (con tal de que esté *dada* la gama de sus entradas), es axiomático que el único modo en que puede elicitarse la naturaleza de su contenido es merced a la transmisión de acciones a su través; lo cual significa que es preciso dar valores de

entrada, observar los de salida y advertir la relación existente entre las parejas de valores correspondientes. En el caso del minino, ello significa que éste tiene que *hacer* cosas diversas con el medio, y que más tarde ha de actuar de acuerdo con el modo en que tales acciones hayan afectado a las variables esenciales; dicho de otro modo, es menester que proceda por "ensayo y error".

En la bibliografía psicológica se habla a veces de la adaptación por ensayo y error como si fuese meramente un modo de adaptarse, y, además, un modo inferior. La argumentación que acabamos de presentar muestra que este proceso ocupa un lugar mucho más fundamental entre los distintos métodos de adaptación: pues hemos hecho ver, en realidad, que cuando el organismo tiene que adaptarse —para mantener sus variables esenciales dentro de los límites fisiológicos— operando a través de un medio cuya índole sea la de un *elemento opaco,* tal proceso es *necesario,* ya que es el único que puede elicitar la información precisa.

Por consiguiente, podemos mirar este proceso desde dos puntos de vista muy diferentes: de un lado, puede tenérselo por una simple tentativa de conseguir lo que se quiera, de suerte que la puntuación obtenida (en lo que respecta a tener éxito) sea cero cuando falle; y desde esta perspectiva se trata, meramente, de un medio de segundo rango de lograr lo que se quiera. Sin embargo, existe el otro punto de vista, que le otorga una condición mucho más elevada por todos conceptos: pues semejante proceso puede desempeñar el inapreciable papel de *reunir información* y esta última es absolutamente necesaria para que se consiga llegar a adaptarse. Esta es la razón por la que este proceso *tiene que* formar parte de la adaptación del gatito.

7/5. Puesto que la cría procede por ensayo y error, su comportamiento final dependerá de los resultados obtenidos en los ensayos y de cómo se hayan visto afectadas las variables esenciales. Ello equivale a decir que estas variables han de tener efecto sobre *qué* comportamiento seguirá el animalito, lo cual equivale, a su vez, a que en el diagrama de efectos inmediatos tenga que haber un canal *desde* las variables esenciales a los parámetros, *S;* de modo que dicho diagrama se parecerá a la figura 7/5/1. Por lo tanto, el organismo capaz de adaptarse posee una salida motórica hacia el medio y *dos* bucles de realimentación: el primero es el que se veía en la figura

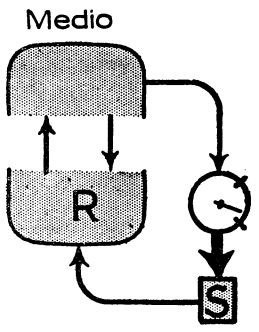


FIGURA 7/5/1.

7/2/1, y consiste en la entrada sensorial ordinaria procedente de los ojos, oídos, articulaciones, etc., que proporciona al organismo una información no afectiva acerca del mundo en torno suyo; la segunda realimentación pasa por las variables esenciales (incluyendo entre ellas otras variables con las que están relacionadas, tales como los receptores del dolor: véase 3/15), informa acerca de si éstas salen o no fuera de sus límites normales y actúa sobre los parámetros S. Aquella retroacción desempeña un papel *dentro* de cada reacción, y esta otra determina la reacción que ha de producirse.

7/6. Como la argumentación en este punto es crucial, vamos a exponerla detalladamente, valiéndonos de los conceptos operacionales básicos de los apartados 2/7-10.

Empezamos con la observación vulgar de que el minino quemado del fuego huye. Lo cual, transcrito en forma completamente operacional, se convierte en:

1) estando las variables esenciales *dentro* de sus límites, el comportamiento manifiesto (de *R*) es tal que lleva a que los parámetros tengan los valores S_1; y
2) cuando las variables son lanzadas *fuera* de sus límites (es decir, cuando el gatito se quema) el comportamiento manifiesto es tal que conduce a que los parámetros posean los valores S_2.

El hecho de que el comportamiento manifiesto cambie hace ver que S_2 no es idéntico a S_1; luego dos valores distintos de las variables esenciales han conducido a valores *distintos* de S, y existe, por tanto, *un efecto inmediato de las variables esenciales sobre los parámetros S.*

7/7. Los mismos datos nos informarán suficientemente acerca de lo que ocurre dentro del segundo bucle; es decir, acerca de cómo afectan las variables esenciales a los parámetros.

La regla básica para la adaptación por ensayo y error es la siguiente: si el ensayo fracasa, cámbiese la forma de comportamiento; si tiene éxito (y sólo en este caso), consérvesela. Veamos ahora el sistema S y cómo debe comportarse: en su interior existen unas variables, que son idénticas a los parámetros de *R* (es un simple cambio de nombre), y para él las variables esenciales constituyen los parámetros, esto es, son su entrada. La regla básica puede formularse de este otro modo, equivalente al anterior:

1) cuando no todas las variables esenciales se encuentran dentro de sus límites normales (o sea, cuando el ensayo ha fallado), no hay *ningún* estado de S que sea de equilibrio (ya que la regla exige que S pase a otro estado); y
2) cuando todas dichas variables *se hallan* dentro de sus límites normales, *todo* estado de S ha de ser de equilibrio (es decir, S ha de encontrarse en equilibrio indiferente).

7/8. Todo cuanto hemos deducido en este capítulo pertenece al orden de lo *necesario*: esto quiere decir que *cualquier* sistema dotado de variables esenciales con unos límites dados y que se adapte valiéndose del proceso de probar diversos comportamientos y de darse cuenta de cómo cada uno de ellos afecta, en definitiva, a aquellas variables, tiene que poseer una segunda realimentación formalmente idéntica (isomórfica) a la que hemos descrito (deducción que tan válida es para los cerebros vivos como para los mecánicos).

Para quedar completamente en claro acerca de esta cuestión, consideremos la posible alternativa. Supongamos que se observase que una especie nueva, o que un nuevo cerebro mecánico, pasaban de la situación de no estar adaptados a la de estarlo (cf. 5/7) en todos los casos, incluso al enfrentarse con circunstancias enteramente nuevas; y supongamos que, pese a lo que hemos dicho antes, las investigaciones pertinentes hiciesen ver de modo concluyente que no existía ninguna segunda realimentación del tipo descrito; ¿qué podríamos decir entonces?

Parece haber solamente dos posibilidades. O bien hemos de apelar a un canal hasta el momento desconocido (no obstante, las investigaciones realizadas), tal como el que se invocó después de la demostración de Hertz (apartado 4/13), o hemos de estar dispuestos a aceptar como algo natural que el sistema S pase a los valores debidos sin que se le suministre la entrada apropiada. No habría nadie que aceptara esta segunda posibilidad, ya que la situación sería análoga a que pidiésemos a un tribunal que considerase natural que un examinando contestase acertadamente sin que se le hubiesen formulado las preguntas. Y si se rechaza esta posibilidad, no nos queda sino la de que *tiene que* haber un segundo canal, del modo que sea.

Implicaciones de la realimentación doble

7/9. Puede ser útil que nos ocupemos ahora desde el punto de vista opuesto de las relaciones entre el comportamiento adaptativo y los mecanismos. En este capítulo hemos dado, hasta este momento, los

hechos por supuestos, y hemos deducido algunas cosas acerca del mecanismo que los subyaga. Vamos a partir ahora de estos mecanismos y a preguntar: dado tal y cuál mecanismo, cualquiera que sea su forma material, ¿tiene que presentar necesariamente un comportamiento adaptativo? La respuesta a esta pregunta nos entretendrá durante el resto de este capítulo y el siguiente.

7/10. Despejemos las asunciones básicas, para comenzar de nuevo por completo, de suerte que desde este instante hasta el final del capítulo asumamos solamente lo que se exprese de forma explícita.

Suponemos que se encuentra ante nosotros un sistema cuyo diagrama de efectos inmediatos es el de la figura 7/5/1; se permite que cierta variable (o varias), a que aplicamos el calificativo de "esencial(es)", actúe o actúen sobre un sistema, *S*, de modo que si dicha variable se encuentra fuera de unos límites dados (o todas ellas, respectivamente, lo están), *S* no varíe, pero que siempre que salga fuera de ellos (la variable dicha o una de ellas, en caso de que haya varias), *S* varíe. (Se supone una multiplicidad de valores posibles de *S* suficiente para que no se formen, por ejemplo, simples repeticiones cíclicas). Supongamos que un sistema, llamado "medio", se encuentra en interacción con otro sistema, *R*, que aquél produce ciertos efectos en la variable llamada esencial (o en las así llamadas) y que *S* origina, a su vez, ciertos efectos en *R*. Dado todo esto y nada más, ¿se sigue que el sistema *R* pasará de actuar de modo no adaptativo frente al medio de hacerlo adaptativamente? (Por el momento, no quiero añadir asunción alguna ulterior; en particular, no quiero restringir la generalidad asumiendo que *R* esté compuesto de partes que se parezcan a neuronas).

7/11. Puesto que el todo consta de dos partes acopladas entre sí —por un lado, el medio y la parte que reacciona, *R*, y por el otro, las variables esenciales y S—, podemos emplear el teorema del veto de 6/9. Según este teorema, el conjunto total sólo puede tener como estados de equilibrio aquéllos que permitan que tanto las variables esenciales como S se encuentren en estado de equilibrio; ahora bien, *S* está en equilibrio únicamente si las variables esenciales se encuentran dentro de límites dados; y de aquí se sigue que en todos los equilibrios posibles del conjunto las variables esenciales se encuentran dentro de tales límites. Por consiguiente, si el conjunto comienza a moverse en cierto estado y sigue una línea de comportamiento, y si llega luego a un equilibrio, *éste tiene que ser siempre un equilibrio adaptado.*

Así pues, arribamos a la solución del problema propuesto al final del

capítulo I: hemos hecho ver en 7/8 que el mecanismo descrito es necesario, y en el presente apartado que es suficiente.

7/12. Sin embargo, esta solución es enormemente abstracta, y deja sin contestación gran número de preguntas suplementarias sobre la cuestión, que podrían muy bien plantearse. Además, no nos proporciona ninguna concepción vividamente imaginativa o intuitiva acerca de lo que ocurre cuando un sistema de este tipo (uno tan complejo como el ser humano, digamos) se ocupa de sus asuntos. Por ello, vamos a dedicar el resto del presente libro a desarrollar todas las muchas implicaciones y particularizaciones de esta solución.

Pero de este modo surge una dificultad. Es fácil que, cuando intentemos seguir, conceptual e imaginativamente, los acontecimientos reales que se produzcan en el sistema total cuando el medio proponga problemas a las variables esenciales (al amenazar con sacarlas fuera de sus límites normales), cuando los valores de *S* determinen un modo concreto de comportarse *R*, cuando este último sistema se comporte de tal manera, en interacción con el medio en todo momento, cuando la salida vaya a parar a las variables esenciales, cuando *S* cambie (o tal vez no cambie), cuando *R* se comporte de otro modo, etcétera, todo ello sea muchísimo más complejo y difícil de captar conceptualmente si las variables del medio, de *R* y de *S* cambian de una forma continua, es decir, por escalones infinitesimales.

La experiencia ha mostrado que tanto el sistema total como sus implicaciones psicológicas y fisiológicas son mucho más fáciles de aprehender y entender si se estudia el caso particular en que lo mismo las variables del medio que las de *R* varían de modo continuo, mientras que las de *S* lo hacen de modo discreto (esto es, por saltos finitos que acaezcan a intervalos finitos). Más adelante (9/4) citaremos algunos datos que sugieren que, en realidad, es probable que tales variables discretas tengan, a veces, verdadera importancia para el sujeto; por el momento, sin embargo, considerémoslas como algo que hemos escogido para facilitarnos la aprehensión.

Las funciones escalonadas.

7/13. Hay ocasiones en que puede describirse el comportamiento de una variable (o de un parámetro) sin hacer referencia a la causa del mismo: si decimos que una variable, o que un sistema, es un "oscilador armónico simple", se entiende perfectamente el sentido de tal frase. Pero

en esta obra nos interesa, sobre todo, el grado de constancia que presenten las variables; y a este respecto pueden distinguirse cuatro tipos, que se representan en la figura 7/13/1: *A*, la **función total,** que carece de todo intervalo finito de constancia (muchas variables físicas pertenecen a este tipo, por ejemplo, la altura barométrica); *B*, la **función parcial,** que posee intervalos finitos de cambio y otros de

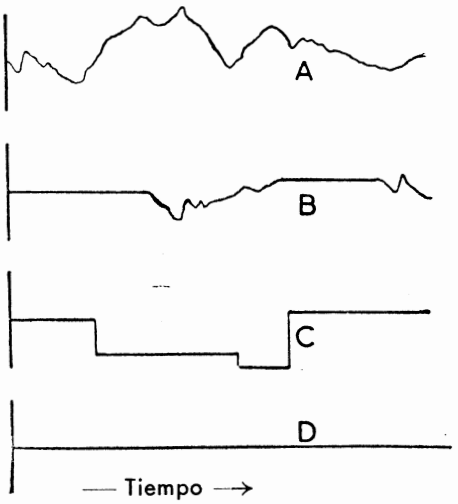


FIGURA 7/13/1. — Tipos de comportamiento de una variable; *A*, función total; *B*, función parcial; *C*, función escalonada, y *D*, función nula.

constancia (nos ocuparemos de él más a fondo en 12/18); *C*, la **función escalonada,** que tiene intervalos finitos de constancia separados por saltos instantáneos; y para completar el juego necesitamos *D*, la **función nula,** que no presenta cambios en todo el período de observación. Como es claro, estos cuatro tipos abarcan todas las posibilidades, salvo que haya formas mixtas. (En la figura 2/12/1 las variables son, respectivamente, función parcial, total escalonada y escalonada).

En todos los casos sólo suponemos que la propiedad característica del tipo se posee durante el período de observación, pues lo que pueda ocurrir en otros momentos carece de importancia.

Hay algunas entidades físicas a las que no es fácil asignar un tipo: así, una nota musical sostenida en el tiempo puede ser considerada tanto de intensidad invariable, y, por consiguiente, una función nula, como representada por partículas de aire que se mueven continuamente, y, por ello, una función total. En todos estos casos la ambigüe-

dad se elimina de una vez si dejamos de pensar en objetos físicos reales, dotados de múltiples propiedades, y escogemos la variable que nos interese.

7/14. Las funciones escalonadas se presentan abundantemente en la naturaleza, aun cuando la misma sencillez de sus propiedades tiende a mantenerlas inadvertidas ("las cosas que se mueven nos llaman la atención antes que lo que no rebulle"). Los ejemplos que siguen se aproximan bastante a funciones escalonadas, y hacen patente su ubicuidad.

1) La *resistencia eléctrica* del interruptor eléctrico permanece constante, excepto cuando cambia de un salto repentino.
2) De modo parecido, los fusibles tienen una *resistencia eléctrica* cuyo valor es pequeño durante cierto tiempo, y que cambia bruscamente a un valor muy elevado.
3) Si se estira un trozo de goma, la tracción que ejerce es aproximadamente proporcional a su longitud, y la *constante de proporcionalidad* posee un valor definido y constante, a menos que se estire tanto el material elástico que éste acabe por romperse; cuando ocurre esto último, dicha constante se convierte de repente en cero, esto es, cambia como lo hace una función escalonada.
4) Si se vierte un chorro continuo de un ácido fuerte en una solución alcalina sin tamponar, el *p*H varía siguiendo aproximadamente una función escalonada.
5) Si se añade lentamente alcohol a una solución acuosa de proteína, agitando al mismo tiempo, la *cantidad de proteína* precipitada aumenta aproximadamente en función escalonada.
6) Al modificarse el *p*H, la *cantidad de substancia adsorbida* suele variar en la forma característica de las funciones escalonadas.
7) En virtud de los principios cuánticos, muchas *variables atómicas* y *moleculares* cambian escalonadamente.
8) Cualquier variable que posea solamente los grados de "todo o nada" ostenta la forma de comportamiento a que nos estamos refiriendo con tal de que cada grado se mantenga durante un intervalo finito.

7/15. El que una variable real pueda o no representarse mediante una función escalonada suele depender del método utilizado y, a veces, de los aparatos de observación. En la práctica, ni los observadores ni los instrumentos registran los valores de las variables a la vez durante inter-

valos muy cortos y muy largos; así, si los vuelos de una abeja destinados a acopiar miel se estudian a lo largo de un día, ordinariamente el observador no sigue los movimientos del insecto hasta los pormenores del ascenso y descenso de las alas, ni registra los cambios que correspondan al hecho de que la abeja sea un poco más vieja tras haber terminado la tarea diaria: se pasan por alto los cambios de posición de las alas, por ser demasiado rápidos (únicamente se advierten valores medios), y con las variaciones de edad se hace lo mismo, por ser excesivamente lentas

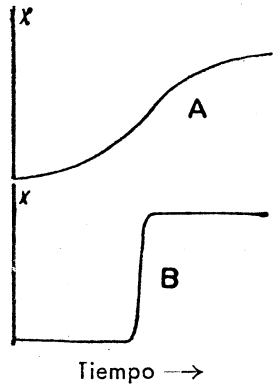


FIGURA 7/15/1. — El mismo cambio, observado en un intervalo de tiempo (*A*) y en un intervalo veinte veces mayor (*B*).

(se considera que el valor es aproximadamente constante). De modo que no se puede decidir, en general, si una variable de un objeto real se comporta como una función escalonada hasta que se hayan especificado los detalles del método de observación.

En la figura 7/15/1 tenemos una ilustración de estas diferencias. Se ha representado allí $x = \text{th}\, t$: cuando se observa de $t = -2$ a $t = +2$, la gráfica tiene la forma *A*, que, evidentemente, no pertenece a una función escalonada; pero cuando se traza la curva de $t = -100$ a $t = +100$, el resultado es *B*, línea que se aproxima a la forma de una función de este tipo.

7/16. Consideramos, como segundo ejemplo, el relevador de telegrafía. Si se lo observa a cada segundo, la conductividad entre los contactos varía casi exactamente como una función escalonada; si, en cambio, se lo observa a cada microsegundo, sus valores cambian de modo mucho más continuo, pues entonces cabe ver cómo los contactos se aceleran, deceleran y saltan, en una trayectoria continua y grácil; y si se lo observa a lo largo de muchos años y se representa gráficamente su conducti-

vidad, no solamente la curva resultante será muy plana, sino que descenderá gradualmente, conforme la oxidación y el desgaste afecten a los contactos.

Tenemos aquí un ejemplo más de la tesis según la cual la especificación de un objeto real no especifica unívocamente el sistema ni el comportamiento (apartados 2/4 y 6/2): preguntas tales como "¿tiene *realmente* el relevador telegráfico un comportamiento en forma de función escalonada?", están mal planteadas, pues preguntan acerca de objetos reales cosas que sólo quedan determinadas por el sistema, que es preciso especificar. (Volveremos a hablar de esta cuestión en 9/10).

7/17. Es probable que veamos comportamientos con forma de función escalonada siempre que observemos una "máquina" cuyos elementos componentes actúen con gran rapidez; así, si por casualidad alteramos el ajuste de una máquina electrónica desconocida para nosotros, no es improbable que observemos de vez en cuando cambios bruscos de comportamiento, cuya brusquedad se debe a la velocidad con la máquina cambia.

Podemos dar razón de ello con la máxima sencillez refiriéndonos a la figura 4/3/1. Supongamos que la curvatura de la superficie dependa de un parámetro que haga que *A* suba y *B* baje. Si la bola se encuentra en reposo en *A*, el primer cambio del parámetro no llevará a variación alguna de la posición lateral de la bola, ya que ésta permanecerá en reposo en *A* (aun cuando la reacción que se produciría si se la desplazase sería menor); si el parámetro continúa cambiando, ella seguirá en el mismo sitio hasta que *A* y *B* se encuentren al mismo nivel; aun en este momento no se moverá, pero en caso de que el parámtro siga modificándose de modo que *A* se eleve sobre *B*, si la gravitación es intensa y la bola tiene una gran movilidad, pasará repentinamente a *B;* y luego permanecerá en esta posición, por mucho que se eleve *A* y que desciendo *B*. Así pues, si el parámetro cambia de forma continua, la posición lateral de la bola tiende a cambiar en forma de función escalonada, a la cual se aproximará tanto más cuanto más veloz sea el movimiento de la bola con una pendiente determinada.

No es necesario que sigamos examinando esta posibilidad, ya que no hemos de extraer deducción exacta alguna de ella; sólo pretendía en este apartado hacer ver que las funciones escalonadas aparecen no infrecuentemente cuando el sistema que se observa contiene elementos de acción rápida; volveremos sobre la cuestión en 9/8.

7/18. En cualquier sistema determinado por estados, el comportamiento de una variable en todo instante depende de los valores que ella misma y las demás tengan en él (véase 2/15). Si una de las variables se comporta como una función escalonada, esta regla sigue vigente: el que aquélla permanezca constante o experimente un cambio está determinado tanto por su propio valor como por los valores de las demás variables. Por lo tanto, dado un sistema determinado por estados con un mecanismo de escalón * situado en un valor concreto, todos los estados en los que se halle tal valor en dicho mecanismo

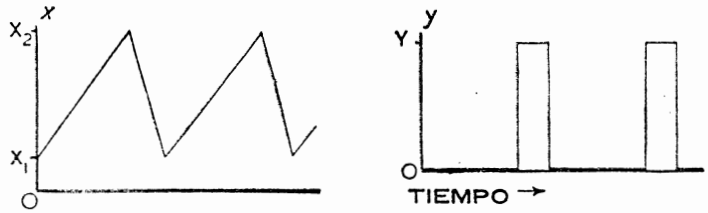


FIGURA 7/18/1. — Diagrama de los cambios producidos en x (volumen de orina en la vejiga) y en y (centro de la micción) tras haberse establecido un funcionamiento automático merced a una transección espinal.

pueden dividirse en dos clases: aquéllos que al acontecer lleven a un cambio en este valor, y aquéllos en que no ocurra tal cosa. Los primeros son los **estados críticos**; en caso de que aparezca uno de ellos, la función escalonada cambiará de valor. (El estado crítico de un fusible eléctrico es el número de amperes que lo haga fundirse, y el de la "constante de proporcionalidad" de un hilo elástico la longitud a la que se rompa).

La fisiología nos proporciona un ejemplo con la vejiga de la orina una vez que, gracias a transección espinal, ha adquirido un modo de actuar automático de vaciamiento intermitente. La vejiga se va llenando continuamente de orina, mas al principio los centros medulares de la micción permanecen inactivos; cuando el volumen de orina excede de cierto valor, estos centros entran en acción y sale líquido, y cuando cae por debajo de otro valor determinado vuelven a la inactividad; las dos variables podrían representarse mediante gráficas análogas a las de la figura 7/18/1. Este sistema de dos variables está determinado por estados, ya que su campo es el de la figura 7/18/2.

---

* Debo al Dr. J. O. Wisdom la sugerencia de que un mecanismo que presente una función escalonada [*step-function*] como característica principal merece que se lo llame "mecanismo de escalón" [*step-mechanism*].

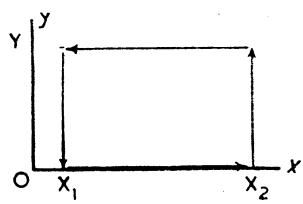


FIGURA 7/18/2. — Campo de los cambios representados en la figura 7/18/1.

La variable y es aproximadamente una función escalonada: cuando se encuentra en 0, su estado crítico es $x = X_2$, $y = 0$, ya que la aparición de tal estado determina que se produzca el salto de 0 a Y; y cuando se encuentra en Y, su estado crítico es $x = X_1$, $y = Y$, pues basta que se presente dicho estado para que salte de Y a 0.

7/19. Una propiedad muy común en todas las máquinas, si bien desestimada, es la de que pueden averiarse o "romperse". Se trata de un acontecimiento perfectamente natural, puesto que ha de seguirse de las básicas leyes de la física y la química y es por tanto, previsible a partir del estado inmediatamente anterior; en general, cuando una máquina se rompe", su punto representativo ha llegado a un estado crítico, y la función escalonada correspondiente ha cambiado de valor.

Como es sabido, casi toda máquina se romperá si se lleva a sus variables suficientemente lejos de sus valores normales: así, las máquinas que tienen piezas móviles se rompen mecánicamente si se las hace funcionar a una velocidad cada vez mayor; los aparatos eléctricos sufren rupturas de aislamiento si se los somete a tensiones o a corrientes más y más elevadas; las máquinas que se calientan excesivamente acabarán por derretirse, y si se enfrían demasiado pueden sufrir otros cambios bruscos, tales como la condensación, que detiene a toda máquina de vapor que trabaje a menos de 100° C; y en cinética química unas concentraciones crecientes pueden tropezar con fenómenos de saturación, o pueden causar la precipitación de proteínas.

Aun cuando no existe ninguna ley rigurosa, se encuentra, sin embargo, en los sistemas una tendencia general a presentar cambios en forma de función escalonada cuando sus variables se llevan a valores muy distintos de los ordinarios. Más adelante (apartado 9/7) indicaremos que el sistema nervioso no es excepcional a este respecto.

Sistemas con mecanismos de escalón

7/20. Cuando un sistema determinado por estados contiene entre sus variables una función escalonada, el comportamiento total puede experimentar una simplificación imposible de conseguir si todas fuesen funciones totales.

Supongamos que tenemos un sistema de tres variables, A, B y S, que

haya sido sometido a ensayos y se haya comprobado que está determinado por estados, que *A* y *B* sean funciones totales y que *S* sea un mecanismo de escalón (lo mismo que en 21/7, llamaremos a *A* y *B* las variables **principales**). El espacio de fases de este sistema se parecerá al de la figura 7/20/1 (en la que hemos dibujado esquemáticamente un posible campo), y no ocupará el continuo de tres dimensiones: ya que *S* puede tomar solamente valores discretos, que en este caso hemos supuesto, por sencillez, que eran sólo dos, dicho espacio se encuentra

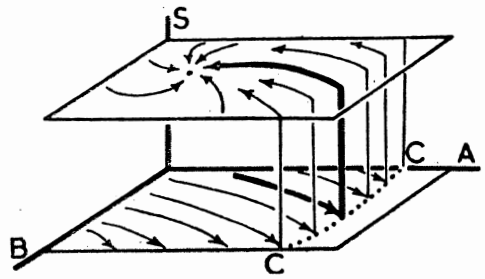


FIGURA 7/20/1. — Campo de un sistema de tres variables determinado por estados, en el que *S* es una función escalonada. Los estados que se encuentran en la línea *C-C* son los estados críticos de esta función en el plano inferior.

confinado dentro de dos planos normales a *S*, cada uno de los cuales corresponde a un valor particular de esta variable. Como *A* y *B* son funciones totales, el punto representativo se moverá siguiendo curvas situadas en uno u otro plano, y describirá una línea de comportamiento, por ejemplo, como la dibujada en trazo grueso en esta última figura; en el punto de encuentro de esta línea con la serie de estados críticos *C-C*, *S* saltará a su otro valor, y el punto representativo continuará moviéndose a lo largo de la línea de trazo grueso del plano superior. En un campo de este tipo, el movimiento del punto representativo está siempre determinado por estados, pues el número de líneas que pasan por un punto cualquiera no excede nunca de una.

Si en nuestro manejo de esta misma "máquina" real pasamos por alto *S* y formamos una y otra vez el campo del sistema compuesto por *A* y *B* (pudiendo *S* tener a veces un valor y a veces otro), en unas ocasiones encontraremos un campo semejante el I de la figura 7/20/2 y en otros al II de la misma figura —aparecerá en cada caso el que corresponda al valor que en aquel momento tenga *S*.

Puede compararse el comportamiento del sistema *AB*, que aparentemente posee dos campos, con el del que habíamos descrito en 6/3, en el cual la duplicidad de valores del parámetro producía asimismo

la apariencia de haber dos campos. Pero en el caso de aquel apartado el cambio de campo se debía a la acción arbitraria del experimentador, que obligaba al parámetro a cambiar de valor, mientras que el paso de uno a otro campo de *AB* se debe a los mecanismos interiores de la "máquina" misma.

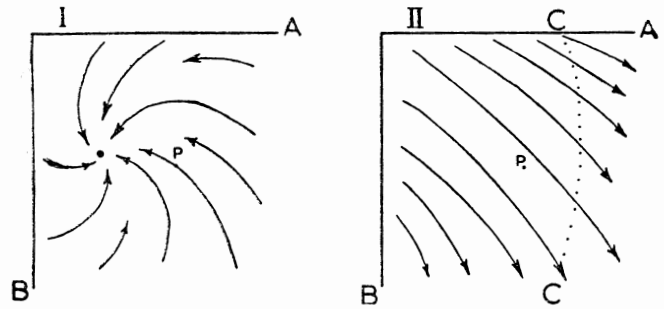


FIGURA 7/20/2. — Los dos campos del sistema formado por *A* y *B*. *P* se encuentra en idéntica posición en ambos.

Podemos enunciar ahora esta propiedad en términos generales. Supongamos, en un sistema determinado por estados, que algunas variables se deban a mecanismos de escalón y que se las ignore, en tanto que las demás (esto es, las variables principales) se observen en gran número de ocasiones y se trace su campo. Entonces, mientras no se produzcan cambios en los mecanismos de escalón durante las observaciones destinadas a averiguar la disposición del campo, encontraremos que las variables principales forman un sistema determinado por estados y que tienen un campo definido; pero *en ocasiones distintas pueden encontrarse campos distintos.*

7/21. Estas consideraciones arrojan bastante luz sobre un antiguo problema de la teoría de mecanismos.

¿Es posible que una máquina esté a la vez determinada y sea capaz de cambiar espontáneamente? Si una persona plantea la cuestión, ésta es contradictoria, pero de hecho existe, ya que cuando se habla de los seres vivos una escuela sostiene que están estrictamente determinados, en tanto que otra defiende que son capaces de cambios espontáneos. ¿Pueden reconciliarse estas dos escuelas?

La presencia de mecanismos de escalón en un sistema determinado por estados permite que ambas tengan razón, con tal de que los sostenedores de la determinación hablen del sistema constituído por *todas*

las variables, mientras que los defensores de la posibilidad de cambios espontáneos se refieran únicamente a las variables principales. Pues el sistema total, que incluye dichos mecanismos, tiene sólo un campo y está completamente determinado por estados (como se ha dibujado en la figura 7/20/1), en tanto que el campo de las variables principales puede ofrecer tantos modos de comportamiento diferentes (tales como los de la figura 7/20/2, I y II) como combinaciones distintas de valores tengan los mecanismos de escalón; y en el caso de que estos mecanismos sean inaccesibles a la observación, el paso de las variables principales de una forma de comportamiento a la otra parecerá espontáneo, ya que no habrá cambio ni estado de tales variables a los que pueda asignarse el papel de causa de tal paso.

7/22. Si el sistema hubiera tenido dos mecanismos de escalón, cada uno dotado de dos valores, hubieran existido cuatro campos de las variables principales. En general, n, mecanismos de escalón, cada uno con dos valores posibles, dan lugar a 2^n campos; luego un número relativamente moderado de mecanismos de esta índole puede proporcionar una cantidad de campos muchísimo mayor.

7/23. Tras esta digresión acerca de las funciones escalonadas podemos volver al sistema del apartado 7/9, con su realimentación correctiva, y estudiar su comportamiento.

Con objeto de que los conceptos se correspondan, asumimos que las variables principales (es decir, las continuas) se encuentran en el medio, en R y en las variables esenciales, mientras que las funciones escalonadas se hallan en S. De ello se sigue que los estados críticos se distribuirán en las regiones del espacio de fases (de las variables principales) en las que las variables esenciales se hallen fuera de sus límites normales. De este modo, si existiesen solamente dos variables esenciales (número tan reducido para facilitar la representación gráfica), la distribución citada podría ocupar la zona punteada del esquema I de la figura 7/23/1 (distribución que significa que el organismo se encuentra en condiciones fisiológicas tolerables si el punto representativo está dentro de la región no punteada).

Supongamos ahora que el primer conjunto de valores de las funciones escalonadas, S, dé lugar a un campo como el de I, y que el punto representativo esté en X; la línea de comportamiento que pasa

por *X* no es estable en esta región, y dicho punto la seguirá hasta llegar a la frontera; al llegar allí (o sea, en *Y*) encuentra un estado crítico y una función escalonada cambia de valor, haciendo que surja un nuevo campo, análogo al II, por ejemplo. El punto representativo se encontrará en *Y*, posición a la que corresponde, de nuevo, una línea de comportamiento inestable en la región del caso: el punto

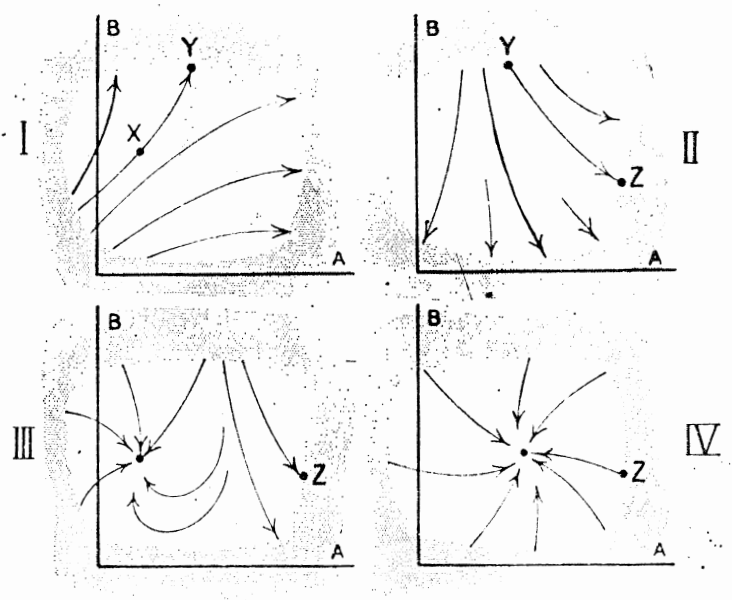


FIGURA 7/23/1. — Cambios de campo en un sistema ultraestable. El punteado marca los estados críticos.

sigue esta línea, llega hasta Z, encuentra allí un estado crítico y origina un cambio de cierta función escalonada; aparece un nuevo campo (III). En éste el punto se encuentra en Z, y el campo tiene una región de equilibrio estable, pero a partir de Z la línea lleva otra vez fuera de la región correspondiente, de modo que se tropieza con un nuevo estado crítico, otra función escalonada cambia de valor y surge un nuevo campo (IV). En éste, la línea de comportamiento procedente de Z es estable con respecto a la región que nos interesa, de modo que el punto representativo va a parar al estado de equilibrio y se detiene en él. No se encuentran ya más estados críticos, ninguna otra función escalonada cambia de valor y, por consiguiente,

no se producen cambios ulteriores de campo; a partir de entonces, si se estudia el campo de las variables principales, se observará que es estable; esto es, si se desplaza moderadamente al organismo de su estado de equilibrio volverá a él, presentando de esta forma las distintas pruebas de adaptación que habíamos advertido en el capítulo V.

7/24. En condiciones externas constantes, tanto este campo como este estado de equilibrio persistirán indefinidamente. Si se somete ahora al sistema a pequeñas perturbaciones impulsoras ocasionales (que, simplemente, desplazarán el punto representativo, como ocurría en 6/5), lo más frecuente será que el conjunto presente estabilidad, con una actuación en la que la parte considerada organismo mostrará tener un mecanismo "adaptado" a habérselas con la parte considerada medio.

Durante la descripción del apartado anterior hemos prestado mucha atención a los ensayos y a los fracasos, de suerte que el campo IV parecía ser no más que el final de una serie de fracasos; pero de este modo tendemos a perder el sentido de la proporción, pues lo que realmente importa para el organismo vivo que aprende algo es el gran número de veces en que podrá ostentar que ha logrado adaptarse; y, en realidad, el tener un cerebro capaz de aprender no reporta ventaja alguna para un organismo a menos que aquel número sea bastante grande y el de ensayos fracasados bastante pequeño.

7/25. Debe pararse mientes en que, para tener éxito, la segunda realimentación no exige nada ni en cuanto a la construcción de la parte que reacciona, *R*, ni en cuanto a los sucesivos valores tomados por *S;* lo cual puede expresarse de otro modo diciendo que este mecanismo no queda desarticulado, en modo alguno, si *R* se construye desde el principio aleatoriamente ni si los valores sucesivos de S se presentan en orden aleatorio (en 13/1 veremos lo que significa esto de "construir aleatoriamente").

En el sistema nervioso se produce probablemente en cierta medida esta construcción aleatoria, ya que sus unidades últimas (dendritas, *pieds terminaux,* acaso moléculas proteicas) se encuentran en cantidades mucho mayores de las que podrían estar sometidas a una determinación pormenorizada por parte de la estructura de los genes (cf. 1/9). Por consiguiente, en la formación del cerebro del embrión es posible que ciertos detalles finales estén determinados por minucias locales

accidentales—tal vez por las concentraciones de oxígeno o de sal, o por esfuerzos locales. Si la parte que reacciona, *R*, se forma inicialmente por semejante proceso, ello no afecta a la acción de la segunda realimentación, que hará que el organismo se adapte.

Análogamente, no hemos hecho ninguna suposición respecto de los sucesivos valores de S (excepto la de que no deben tener ninguna correlación apreciable con los acontecimientos que se produzcan en el campo); por tanto, cualquier fuente independiente sirve para introducirlos, y, por consiguiente, pueden ser aleatorios en el sentido definido.

El sistema ultraestable

7/26. En la primera edición de esta obra llamaba yo "ultraestable" al sistema descrito en el presente capítulo, y el apartado 8/6 hará ver que semejante adjetivo tiene su justificación; ahora bien, entonces creía que se trataba de un sistema único, pero la experiencia posterior (que he bosquejado en *I. to C.*, apartados 12/8-20) ha mostrado que se trata solamente de una forma perteneciente a una amplia clase de formas emparentadas entre sí, entre las que se destaca no más que por presentar con desusada nitidez ciertos rasgos de interés biológico extraordinario. En cuanto al vocablo aludido, tiene utilidad el que lo conservemos — siguiendo la estrategia del apartado 2/17 —, ya que representa un tipo perfectamente definido, que nos puede ser muy útil, porque, por estar fijado, el estudio puede moverse en torno suyo sin ambigüedades y es posible referir a él gran cantidad de formas más o menos parecidas que se encuentran principalmente en el mundo biológico.

Es conveniente que enunciemos su definición de modo formalizado: dos sistemas de variables continuas (a los que llamamos "medio" y "parte que reacciona") se encuentran en interacción, lo cual quiere decir que existe entre ellos una realimentación primaria (a través de unos complejos canales sensoriales y motóricos); otra realimentación, que funciona intermitentemente y a una velocidad de orden mucho menor, procede del medio y actúa sobre ciertas variables continuas, que, a su vez, afectan a ciertos mecanismos de escalón, haciendo que éstos cambien de valor precisamente cuando y solamente cuando aquellas variables salgan de ciertos límites previamente dados; y los mecanismos de escalón afectan a la parte que reacciona: al actuar como parámetros de ella determinan el modo cómo responderá al medio.

(Partiendo de este tipo básico pueden formarse muchas variaciones, cuyo estudio se facilita mucho cuando se captan a fondo las propiedades de la forma fundamental que acabamos de definir.)

7/27. Esta forma básica posee muchas más propiedades de interés de las que hasta ahora hemos indicado; pero su exposición meramente lingüística, sin embargo, puede hacerse tediosa y poco convincente. Mediante una máquina construída de modo que conociésemos su estructura con exactitud y en la que pudiésemos observar lo que ocurra en diversas condiciones (a la cual cabría describir como "máquina que piensa por nosotros" o, con expresión más respetable, como "calculadora analógica") podríamos hacerlas patentes de modo muy preferible. Hemos construído una máquina de esta índole, y la hemos llamado "homeóstato"; en el próximo capítulo expondremos su construcción y su manera de comportarse.

El homeóstato

8/1. El sistema ultraestable posee una riqueza de propiedades interesantes mucho mayor de lo que podría suponerse inicialmente; algunas tienen un interés especial para el fisiólogo y psicólogo, pero es menester que se las haga manifiestas convenientemente antes de que puedan percibirse sus aplicaciones fisiológicas y psicológicas. Se ha construído una máquina que se sujeta a la definición del sistema ultraestable, y que permite que tales propiedades se manifiesten; en el presente capítulo nos ocuparemos de ella y de su comportamiento *.

8/2. El homeóstato (fig. 8/2/1) consta de cuatro unidades, cada una de las cuales lleva en su parte superior un imán giratorio (fig. 8/2/2; figura 8/2/3, *I*). Las desviaciones angulares de los cuatro imanes con respecto a sus respectivas direcciones centrales constituyen las cuatro variables principales.

Vamos a describir su construcción por estadios. De cada unidad procede una corriente (continua) de salida, proporcional a la desviación citada de su imán; proporcionalidad que se logra del modo que vamos a exponer. Delante de cada imán se encuentra un canalón lleno de agua, y unos electrodos sumergidos en los extremos establecen en él un gradiente de potencial; el imán arrastra consigo un alambre que se introduce en el agua, adquiere un potencial que depende de la orientación de aquél y lo envía a la rejilla de un tríodo; desde *J* se alimenta el ánodo de éste a 150 V, en tanto que la tensión de *H* es de 180 V, de modo que por *E* pasa una corriente constante; y si la tensión de la rejilla permite que pase justamente esta intensidad a través de la válvula, por el terminal de salida no circulará ninguna corriente. Pero si por la válvula pasa una corriente mayor o menor que la aludida, por el circuito de salida circulará la diferencia entre ambas, en una

* Le hemos dado el nombre de "homeóstato" para que sea más fácil referirse a ella, nombre, por lo demás, que parece aceptable. Sin embargo, los derivados "homeostático" y "homeostáticamente" no son felices, porque sugieren que se alude a la máquina, mientras que la prioridad pide que se empleen únicamente como derivados de la "homeóstasis" de Cannon.

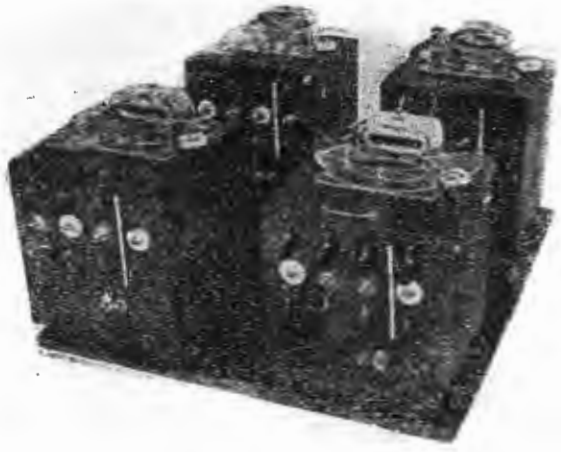


FIGURA 8/2/1. — El homeóstato. Cada unidad lleva encima un imán y una bobina como los de la figura 8/2/2. Los botones de cada panel delantero están dispuestos del modo siguiente: los de la parte superior regulan los potenciómetros, los intermedios mandan los inversores y los de la fila inferior los sorteadores, *S*, de la figura 8/2/3.

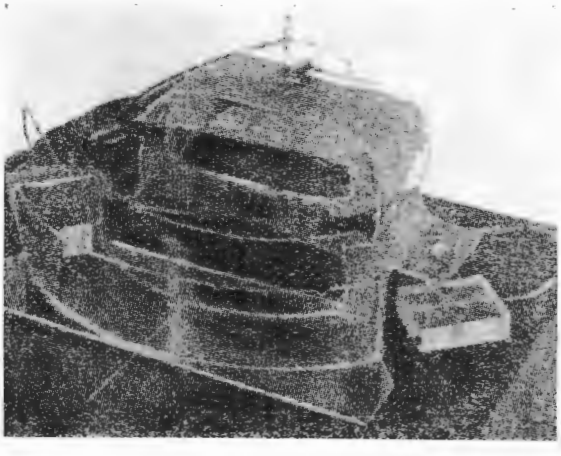


FIGURA 8/2/2. — Conjunto tipo de imán (justamente visible [en el interior de la bobina]), bobina, eje, molinete y potenciómetro de agua con sus electrodos en los extremos. La bobina tiene un devanado cuádruple, formado por los *A*, *B*, *C* y *D* de la figura 8/2/3.

dirección o en la contraria; de modo que, una vez ajustada *E*, la salida es aproximadamente proporcional a la desviación de *I* con respecto a su orientación central *.

Además, las unidades se encuentran enlazadas entre sí de modo que cada una envíe su salida a las otros tres, y, por consiguiente, que reciba una entrada procedente cada una de ellas.

Estas entradas actúan sobre el imán de la unidad del caso merced

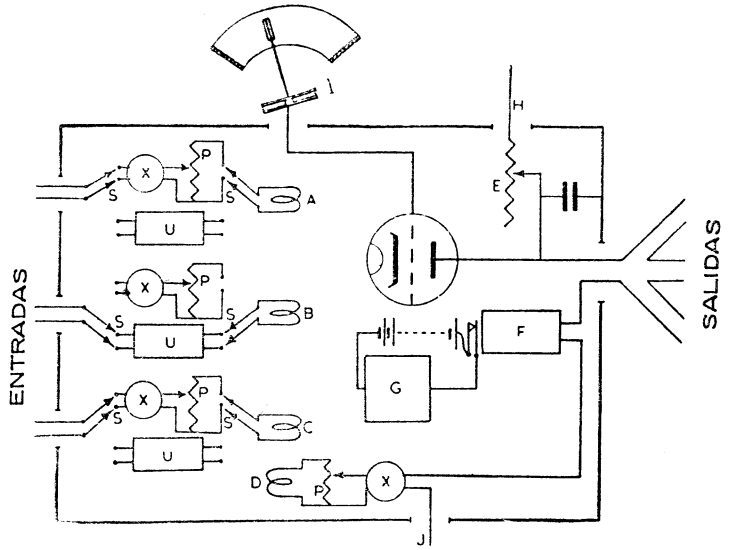


FIGURA 8/2/3. — Diagrama eléctrico de una unidad del homeóstato (el significado de las letras se explica en el texto).

a los devanados *A*, *B*, y *C*, de modo que el par de giro que mueve aquél es aproximadamente proporcional a la suma algebraica de las corrientes que recorran tales devanados (y el *D*, que afecta a *I* en calidad de realimentación); pero antes de que cada entrada puede pasar por su devanado atraviesa un conmutador-inversor (*X*), que determina la polaridad de la corriente que circulará por él, y un potenciómetro (*P*), que fija qué fracción de la entrada llegará al devanado.

Tan pronto como se conecta todo el sistema, los imanes se desplazan, movidos por las corrientes procedentes de los otros circuitos; pero estos movimientos hacen que tales corrientes varíen, lo cual modifica los movimientos, y así sucesivamente. Puede demostrarse (véase 19/11)

* Siguiendo el principio de la máquina original, el señor Earl J. Kletsky, de la Technische Hogeschool de Delft, en Holanda, ha proyectado y construído una nueva forma de ella que reemplaza el imán, las bobinas, el molinete y el agua por un montaje de circuitos y de capacitores basado en [las leyes de] Kirchhoff.

que si el líquido de los canalones tiene suficiente viscosidad, el sistema de cuatro variables formado por las cuatro orientaciones de los imanes está aproximadamente determinado por estados; los inversores y los potenciómetros [no los de agua, sino los *P*] sirven, pues, de parámetros de tal sistema.

Cuando estos parámetros toman un conjunto definido de valores, los imanes siguen cierta línea de comportamiento definida, ya que aquéllos determinan el campo y, por tanto, las líneas de comportamiento. Si el campo es estable, los cuatro imanes se colocan orientados en posición central, y resisten a todo intento de desplazarlos de ella; cuando, pese a todo, se los mueve, una actividad *coordinada* los hace volver al centro. Otros conjuntos de parámetros pueden dar origen a inestabilidad, sin embargo: en estos casos aparece un "escape", y los imanes se alejan de sus orientaciones centrales con velocidad creciente, hasta que golpean los extremos de los canalones.

Hasta ahora hemos visto solamente que este sistema es dinámico, que su diagrama de efectos inmediatos es el de la figura 4/15/1, *A*, y que está determinado por estados; su campo depende de los treinta y dos parámetros *X* y *P*, pero no es ultraestable. Mas las entradas, en lugar de regularse mediante unos parámetros fijados a mano, pueden asimismo sortear éstos y pasar, a través de un conmutador-sorteador, *S*, por elementos análogos a ellos pero dispuestos en un uniselector — o "conmutador de escalones" —, *U* (cuyos elementos tienen valores aleatorizados gracias a haber adoptado las cifras proporcionadas por las tablas de números aleatorios de Fisher y Yates); de entre los parámetros así materializados en los uniselectores se escogen en cada momento los valores determinados por la posición de estos aparatos, de modo que, como cada uno tiene veinticinco posiciones y hay cuatro (uno en cada unidad), el número de combinaciones posibles de valores de los parámetros es de 390.625.

F representa la variable esencial de la unidad que sea; sus contactos se cierran si y solamente si la corriente de salida excede de cierto valor; cuando ocurre tal cosa, pasa corriente por el devanado *G* del uniselector y éste puede activarse, haciendo que los parámetros pasen a tener otros valores. Otro aparato (no representado en el diagrama) interrumpe la llegada de corriente a *G*, pues no permite que este devanado se alimente a través de los contactos de *F* (en caso de que estén cerrados) más que a intervalos determinados, que pueden prefijarse entre uno y diez segundos; así, en caso de que se hayan escogido intervalos de tres segundos, cada tres el uniselector o bien pasará a otro valor (cuando por *F* circule una corriente superior a los

límites establecidos) o permanecerá donde esté (si la corriente de *F* se halla dentro de tales límites).

8/3. Podemos comprobar que esta máquina es ultraestable examinando las correspondencias con una máquina de este último tipo.

Existen cuatro variables, que son las orientaciones de los imanes (naturalmente, pueden ser menos en cuanto no se utilicen todas las unidades); con ellas se representa tanto el medio como la parte que reacciona, *R*, de la figura 7/2/1, y la asignación a un subsistema u otro es arbitraria. Los relevadores *F* corresponden a las variables esenciales, y los límites fisiológicos corresponden a las corrientes que circulan por *F* cuando las agujas [unidas a los imanes] se separan más de 45 grados de sus respectivas posiciones centrales. Las variables principales son continuas y actúan unas sobre otras, contituyendo la realimentación primaria, que es compleja, como la representada en la figura 4/15/1, *A*. El campo de estas cuatro variables tiene solamente un estado de equilibrio (orientaciones centrales), que puede ser estable o inestables; así pues, o bien el sistema es estable y autocorrector para pequeños desplazamientos impulsores de las agujas, o es inestable y autoempeorador, desplazándose hasta los extremos de los canalones. Y el que sea una cosa o la otra depende de los detalles cuantitativos de las realimentaciones primarias, los cuales dependen, a su vez, de los valores de los mecanismos de escalón.

Podemos hacer corresponder los mecanismos de esta índole del apartado 7/12 con las estructuras del homeóstato de varios modos, que son equivalentes entre sí. Acaso la manera más sencilla sea la de identificarlos con los doce valores presentados por los uniselectores (tres en cada uno de ellos) en un momento cualquiera: si la aguja de una unidad se separa de los límites de $\pm 45°$ unos cuantos segundos de arco, los tres valores de las tres funciones escalonadas dichas pasarán a otros tres — los cuales no tendrán nada que ver ni con los valores anteriores ni con la dificultad encontrada por el aparato, pues serán, simplemente, los valores que sigan a aquéllos en las tablas de Fisher y Yates.

Puede verse fácilmente que si se utilizan sólo una, dos o tres unidades (como se hace a menudo en beneficio de la sencillez), el subsistema así formado sigue siendo ultraestable.

El homeóstato en su aspecto adaptativo

8/4. Una propiedad muy notable del sistema nervioso es su capacidad para adaptarse por sí solo a las alteraciones quirúrgicas de su estructura corporal; desde los primeros trabajos, de Marina, hasta los recientes de Sperry, semejantes experimentos han despertado siempre interés y no poca sorpresa.

Hace más de cuarenta años, Marina seccionó las uniones de los

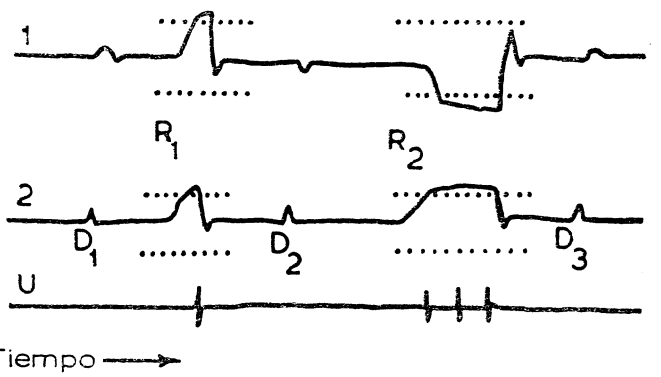


FIGURA 8/4/1. — Dos unidades (1 y 2) en interacción. La línea 1 representa los movimientos laterales de la aguja de la unidad 1 mediante desplazamientos verticales, y la línea 2 el comportamiento de la aguja de la unidad 2 (del mismo modo). La línea inferior (*U*) tiene un trazo transversal cuando el uniselector de la unidad 1 avanza un escalón. Las líneas de puntos corresponden a estados críticos. Los desplazamientos *D* se deben al operador, que obligó de esta manera al sistema a poner de manifiesto su forma de responder.

músculos rectos internos y externos del globo ocular de un mono y volvió a unir estos músculos en posición cruzada, de modo que la contracción del recto externo hiciera girar la córnea hacia el interior, y no hacia el exterior. Una vez curadas las heridas, observó, sorprendido, que los dos globos oculares seguían moviéndose en forma concorde, con lo que se conservaba la visión binocular.

Hace menos tiempo, Sperry cortó los inervadores de los músculos flexores y extensores del brazo del mono araña, y los ligó de nuevo después de cruzarlos. Una vez que los nervios se hubieron regenerado, al principio el animal movía los brazos con una enorme falta de coordinación, pero luego mejoró, hasta llegar un momento en que se había reestablecido un modo de progresión esencialmente normal. Estos dos ejemplos son típicos de un gran número de experimentos, y nos bastarán para nuestro debate. Veamos lo que hará el homeóstato cuando se lo someta a una operación análoga.

En la figura 8/4/1 se observa el funcionamiento de este aparato (simplificado de modo que sólo dos unidades se encuentren en interacción). Al principio, el diagrama de efectos inmediatos era $1 \rightleftarrows 2$: el efecto $1 \rightarrow 2$ estaba regulado a mano, y el $2 \rightarrow 1$, por el uniselector; asimismo, los valores de los mecanismos de escalón estaban combinados de modo que se había logrado la estabilidad, como hacen ver las respuestas a D_1 (el lector debe guardar en las mientes, desde luego, que este trivial retorno tras el desplazamiento *representa* todos los complejos retornos posteriores a un cambio considerados en el capítulo V, "La adaptación como estabilidad"). En R_1 se cambió a mano la posición del conmutador-inversor, lo cual convirtió el sistema en inestable: se produjo un escape y las variables entraron en los estados críticos; pero al moverse el uniselector de la unidad 1 dió lugar, inmediatamente, a un campo estable, como muestra el primer ensayo a que se lo sometió. (Adviértase que, mientras que antes de R_1 el movimiento hacia arriba de D_1 —en la unidad 2— daba origen a otro también *hacia arriba* en la unidad 1, después de R_1 origina un movimiento *hacia abajo,* lo cual hace ver que el uniselector ha invertido la acción $2 \rightarrow 1$, inversión que *compensa* la de $1 \rightarrow 2$ efectuada en R_1).

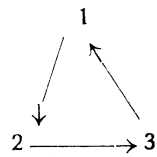
En R_2 se repite todo el proceso. Esta vez se precisan tres cambios del uniselector para restaurar la estabilidad; y la comparación del efecto de D_3 sobre la unidad 1 con el que había tenido D_2 enseña que ha vuelto a haber compensación.

Para poner en correspondencia estos dos fenómenos hemos de darnos cuenta, como en el apartado 3/12, de que el criterio anatómico no es el único posible para la división del sistema en "animal" y "medio", sino que también cabe el funcional. Supongamos que un mono haya de tirar de una palanca hacia sí para sacar alimentos de una caja; si le seccionamos los músculos flexor y extensor del brazo y los ligamos de nuevo cruzados, el cambio producido, para la corteza cerebral, no difiere esencialmente del que se tendría desmontando la caja y montándola de nuevo de modo que fuese necesario empujar la palanca en vez de tirar de ella; la médula espinal, los nervios periféricos, los músculos, huesos, palanca y caja forman todos parte, para ella, del "medio"; y una inversión en el córtex compensará una inversión en su medio, ya sea en la médula, los músculos o la palanca. Parece razonable, por consiguiente, esperar que la corteza cerebral emplee los mismos procesos compensatorios, cualquiera que sea el lugar en que se produzca la inversión.

Para aplicar el principio de la ultraestabilidad hemos de añadir la asunción de que la "visión binocular" y la "progresión normal" tie-

nen correlatos neurales tales que las discrepancias que se produzcan con respecto a ellos originen excitaciones suficientes para dar lugar a cambios en forma de funciones escalonadas en los mecanismos cerebrales que determinen la acción en cada caso (suposición sobre cuya plausibilidad hablaremos en el apartado 9/4). Entonces, la ultraestabilidad conducirá automáticamente a la aparición de un comportamiento que logre la visión binocular o la progresión normal.

8/5. En la figura 8/5/1 vemos un ejemplo más complejo. La máquina se había dispuesto de modo que el diagrama de efectos inmediatos fuese el siguiente:



El efecto $3 \rightarrow 1$ estaba fijado permanentemente de suerte que un movimiento de 3 hiciese moverse a 1 en la dirección opuesta; la acción $1 \rightarrow 2$ estaba mandada por uniselector, y la $2 \rightarrow 3$ a mano. Al comen-

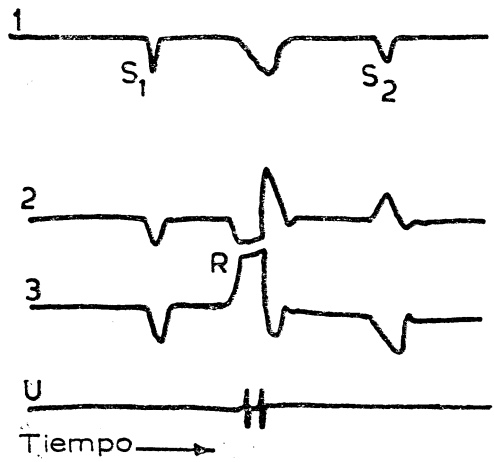


FIGURA 8/5/1. — Interacción de tres unidades. En *R* el efecto de 2 sobre 3 invierte su polaridad.

zar el registro de la gráfica se hicieron patentes las acciones $1 \rightarrow 2$ y $2 \rightarrow 3$ al mover el operador a mano hacia abajo 1 : 2 siguió a 1 hacia abajo (con movimiento análogo, pues) y 3 siguió a 2 también hacia abajo (asimismo con movimiento análogo); pero 3 obligó a 1 a moverse hacia arriba, oponiéndose al movimiento inicial, e hizo aparecer estabilidad.

En *R* se invirtió el mando manual (2 → 3), de forma que ahora 2 obligaba a 3 a moverse en dirección *contraria* a su propio movimiento; esta modificación dió lugar a un círculo vicioso y acabó con la estabilidad; pero se produjeron unos cambios en el uniselector, hasta que ésta reapareció. Y un movimiento obligado hacia abajo de 1, S_2, permite ver que, efectivamente, se ha vuelto a la estabilidad.

Esta gráfica, sin embargo, merece un estudio más detallado. En *R* se invirtió la acción 2 → 3, y las respuestas de 2 y 3 en S_2 hacen patente tal inversión, pues mientras que en S_1 se desplazaban de manera análoga, en S_2 lo hacen en sentido contrario, y, del mismo modo, cuando la acción 1 → 2, mandada por el uniselector, se compara antes y después de *R*, se advierte que si al principio 2 se movía de manera análoga a 1, luego se mueve en forma opuesta. Así pues, la inversión en 2 → 3, causada por el operador, ha suscitado una inversión en 1 → 2, que está mandada por el uniselector; la segunda inversión compensa la primera.

El sistema nervioso nos proporciona gran cantidad de ejemplos de tal serie de acontecimientos: esto es, primeramente de la reacción ya establecida, luego de una alteración del medio causada por el experimentador y, finalmente, de una reorganización dentro del sistema nervioso que compense la alteración experimental. Por tanto, el homeóstato manifiesta, en forma elemental, esta capacidad de auto-reorganización.

8/6. Estamos ahora en condiciones de apreciar toda la diferencia que existe entre un sistema ultraestable y un simple sistema estable cuando las condiciones permiten que aquélla se muestre claramente.

El mejor modo de verla es con un ejemplo. El piloto automático es un dispositivo que, entre otros efectos, produce el de mantener el aeroplano horizontal [y en línea recta]; por consiguiente, ha de conectársele a los alerones de tal modo que cuando el aparato se desvíe hacia la derecha, su salida actúe sobre ellos de modo que tienda a desviarlo hacia la izquierda. Instalado, pues, como es debido, el conjunto del sistema es estable y autocorrector; en tales condiciones puede volar sin peligro en una atmósfera turbulenta, ya que, si bien se desviará con frecuencia, tenderá siempre a nivelarse. Si se conectase al homeóstato en esta forma, tendería a hacer lo mismo (aun cuando no está preparado del mejor modo para ello, si se le instalase un giróscopo sería capaz, en principio, de corregir las desviaciones).

Por ahora no se ve ninguna diferencia entre ellos; pero conectemos los alerones al revés y comparémoslos. El piloto automático, tras

una perturbación de poca importancia, tendería a *aumentar* el giro, y persistirá hasta el fin en esta actuación equivocada. El homeóstato, en cambio, persistiría en ella hasta que el aumento de desviación bastase para hacer que los mecanismos de escalón empezaran a cambiar de valor; y en cuanto apareciese uno apropiado tendería a estabilizar en lugar de a volcar: haría volver el aeroplano al vuelo horizontal [y en línea recta], de modo que normalmente se corregiría a sí mismo de toda perturbación.

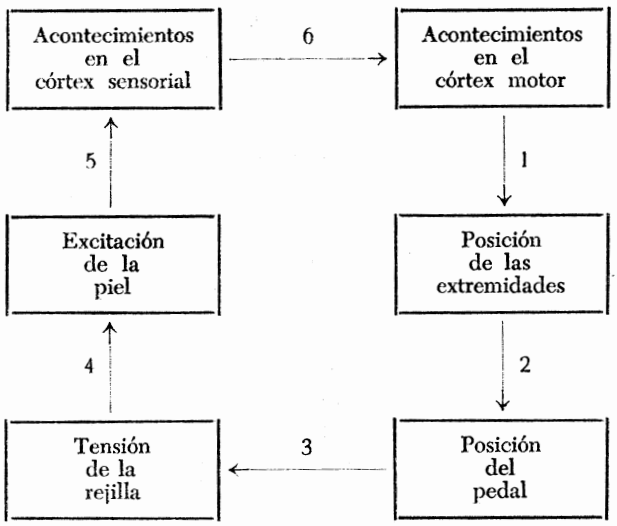
Por consiguiente, está algo justificado que utilicemos el nombre de "ultraestable", pues si las variables principales se articulan entre sí de modo que su campo sea inestable, el sistema ultraestable cambiará éste hasta llegar a uno estable; luego el grado de estabilidad que presenta es de orden superior al de los sistemas dotados de un solo campo.

8/7. Los experimentos de Marina y Sperry nos sirven excelentemente de introducción, debido a ser tan sencillos conceptualmente. Hay ocasiones, en cambio, en que un experimento de adaptación muy simple puede exigir un poco de reflexión para que podamos identificar sus rasgos esenciales. Así, Mowrer colocó una rata en una caja que tenía por piso un enrejado metálico, que podía electrificarse para producir una serie de sacudidas eléctricas a la rata en las patas; y dentro de la caja había un pedal que al ser apretado hacía cesar las descargas eléctricas.

Cuando se colocaba un animal en la caja y comenzaba la estimulación indicada, la rata ejecutaba diversas actividades no dirigidas, tales como saltar, correr, chillar, morder la rejilla y agitarse al azar, de un sitio para otro; pero más tarde o temprano, pisaba el pedal y ello detenía las descargas; normalmente, al cabo de diez pruebas la aplicación de éstas bastaba para que la rata fuese directamente hacia el pedal y lo oprimiese. Estos son, referidos brevemente, los hechos observados.

Prestemos atención a los enlaces internos del sistema. Podemos especificar suficientemente lo que ocurría utilizando seis variables, o conjuntos de ellas, que son los que se indican en el diagrama de elementos impreso en la página siguiente.

Al considerar las acciones que sabemos efectúan unas partes del sistema real sobre otras podemos construir el diagrama de efectos inmediatos; así, es seguro que la excitación del córtex motor rige los movimientos del cuerpo de la rata, y que no ejerce acción directa alguna sobre ninguno de los otros cinco grupos de variables, de modo que podemos dibujar la flecha 1 y sabemos, además, que ninguna otra fle-



cha sale del elemento contenido en el rectángulo correspondiente (es claro que esta flecha, aunque sencilla, representa un canal muy complejo); de modo análogo se dibujan las demás flechas del diagrama. (Algunas de éstas, por ejemplo, la 2 y la 4, representan un enlace al que no corresponde durante todo el tiempo una acción física positiva, pero, de acuerdo con lo dicho en 2/3, entendemos que los elementos correspondientes están enlazados permanentemente, sólo que a veces con grado cero.)

Una vez acabado el diagrama, nos percatamos de que forma un circuito funcional: el sistema está completo y aislado, y, por consiguiente, puede considerárselo determinado por estados. Con objeto de aplicar nuestra tesis, suponemos que la parte cerebral, representada por los elementos encerrados en los rectángulos a uno y otro lado de la flecha 6, contiene mecanismos de escalón, a cuyos estados críticos se llegará si se envían al cerebro estímulos de intensidad superior a la fisiológica.

Admitiremos ahora que el sistema sea ultraestable, y vamos a predecir cuál tiene que ser su comportamiento. Por hipótesis, parte de un estado inicial en el que la tensión es elevada, por lo cual las excitaciones de la piel y del cerebro serán también altas; al principio, la configuración de la serie de impulsos que se envían a los músculos no da lugar a que se oprima el pedal que haría disminuir la tensión de la rejilla; pero la elevada excitación a que está sometido el cerebro hará que ciertos mecanismos de escalón cambien de valor, lo cual dará origen a la aparición de otros tipos de movimiento corporal.

Estos mecanismos actuarán directamente sólo en la etapa 6, pero los cambios que allí se produzcan afectarán al campo de los seis grupos de variables principales (cf. 12/9); cambios de campo que durarán mientras persista en el cerebro una excitación elevada, pero que cesarán cuando (y sólo cuando) las ligaduras del estadio 6 transformen una excitación de los receptores de la piel en unos movimientos tales que consigan, gracias a oprimir el pedal, reducir esta misma excitación; pues únicamente tales ligaduras pueden impedir toda otra recaída en estados críticos. Esto es, el sistema cambiará hasta que aparezca un campo estable; estabilidad que quedará de manifiesto porque un aumento de tensión de la rejilla dará origen a ciertos cambios que pasarán por la piel, el cerebro, los músculos y el pedal, y tendrán por efecto el de *oponerse* a tal aumento de tensión; además, la estabilidad presenta la propiedad de conservar las variables fisiológicas dentro de límites fisiológicos, ya que gracias a ella la rata no sufre daños causados por la electricidad y el sistema nervioso no se agota.

Notemos que, si bien no existe conexión alguna directa entre la acción 3 y el lugar en que se produzcan los cambios de 6, ni visiblemente (en el aparato real) ni funcionalmente (en el diagrama de efectos inmediatos), este lugar llega a adaptarse a la naturaleza de aquella acción (hemos hablado ya de este punto, en 5/13).

Por consiguiente, este ejemplo muestra que si la rata y su medio formasen un sistema ultraestable y actuaran de modo puramente automático, experimentarían los mismos cambios que ha observado Mowrer.

El adiestramiento

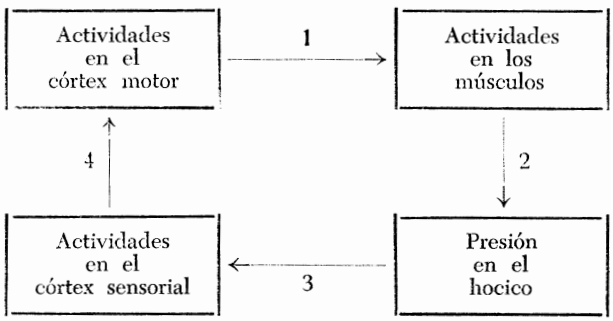
8/8. Vamos a ver qué relación guarda con la ultraestabilidad el proceso de "adiestramiento" (o "amaestramiento").

Tal proceso entraña siempre el empleo de "premios" y "castigos", conceptos que hemos de traducir a la forma admitida por nosotros. El de "castigo" es muy sencillo, pues significa que se estimulen algunos órganos de los sentidos o terminaciones nerviosas lo suficiente para que se produzcan cambios de escalón en el sistema nervioso (apartados 7/19 y 9/7). El concepto de "premio" es más complejo; por lo pronto, suele implicar que se facilite alguna substancia (por ejemplo, alimento) o alguna situación (por ejemplo, huída) cuya falta actuaría como "castigo"; la mayor dificultad reside en que los testimonios y datos que tenemos sugieren que el sistema nervioso incluye, especialmente en los mamíferos, ciertos mecanismos muy intrincados y especializados que permiten que el animal tenga propiedades no deductibles de sólo

unos principios básicos; así, se ha visto que los perros provistos de una fístula esofágica y privados de agua durante cierto número de horas beben, cuando se les presenta agua, la cantidad aproximadamente suficiente para corregir los efectos de la privación, y luego se detienen; es decir, dejan de beber aun cuando no les haya entrado agua en el estómago (ni en ninguna otra parte del sistema). Todavía no se han elucidado enteramente las propiedades de estos mecanismos, y, por ello, el adiestramiento mediante premios o recompensas emplea mecanismos de propiedades desconocidas. Nosotros vamos a dejar de lado aquí todas esas complicaciones; supondremos que se adiestra o amaestra valiéndose del dolor, o sea, mediante algún cambio que amenace con sacar las variables esenciales fuera de sus límites normales, y asumiremos que el adiestramiento con premios no ofrece ninguna diferencia esencial con éste.

Debe pararse mientes en que en los experimentos de esta índole el experimentador suele desempeñar un papel doble: primeramente planea la prueba, decidiendo qué reglas habrán de obedecerse para efectuarla; y luego, una vez fijadas aquéllas, toma parte en el experimento y las obedece. No nos vamos a ocupar del primer papel; pero en cuanto al segundo importa mucho advertir que el experimentador se encuentra, cuando lo desempeña, *dentro* del dispositivo funcional del experimento (afirmación cuya verdad salta más a la vista cuando algún ayudante sin preparación, pero perfectamente obediente, ocupa el lugar del experimentador y ejecuta las instrucciones de modo ciego; y todavía más si en su puesto se coloca un aparato que realice automáticamente las acciones prescritas.

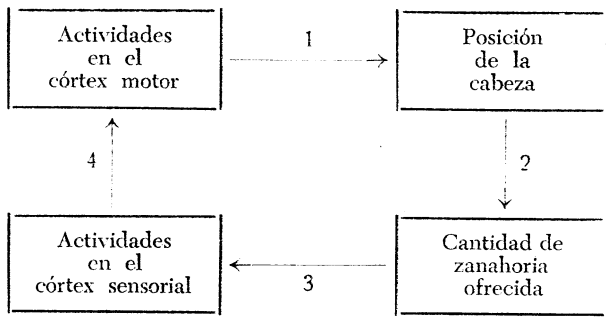
Cuando se prepara todo para que el adiestramiento se produzca en forma automática, es fácil hacer patente la realimentación sin más que construir el diagrama de efectos inmediatos. Sea el caso del lucio que se encontraba en un acuario separado de unos peces blancos por un vidrio y que cada vez que se lanzaba contra éstos chocaba contra la luna. Podemos distinguir claramente los efectos inmediatos siguientes:



El efecto 1 representa el mando que se ejerce a través de la médula espinal y de los nervios motores; el 2 es discontinuo, pero, no obstante tal cosa, claro: pues el experimento implica que ciertas actividades llevaban a la aparición de fuertes presiones en el hocico, mientras que otras conducían a una presión nula; en cuanto a los efectos 3 y 4, se trata simplemente de los efectos neurofisiológicos de los golpes de presión en el hocico.

Aunque se goza de cierta libertad en la elección de las variables que se hayan de mencionar en el diagrama, es evidente que el sistema, en conjunto, posee realimentación.

En otros experimentos de amaestramiento la regularidad de la acción 2 (que en el arriba citado se debía a la constancia de las propiedades físicas del vidrio) puede conseguirse merced a la actuación de un ayudante que obedezca simpre a las reglas establecidas por el experimentador. Grindley, por ejemplo, mantenía un conejillo de Indias en una cámara silenciosa en la que, de vez en cuando, sonaba un zumbador; si y sólo si el animal movía entonces la cabeza hacia la derecha, aparecía una bandeja con un trozo de zanahoria en ella, que se retiraba tras unos pocos mordiscos; y el proceso empezaba de nuevo. Puede patentizarse la existencia de realimentación en este sistema, ya que el diagrama de efectos inmediatos es el que sigue:



El zumbador, que hemos omitido por razones de claridad, constituye un parámetro cuyo único papel es el de dar existencia funcional a este sistema dinámico, pues solamente cuando él suena existe la ligadura 2.

Este tipo de experimento revela con más claridad su estructura, esencialmente dinámica, cuando se lo contrapone al condicionamiento pavloviano elemental: tanto en el experimento de Grindley como en los de Pávlov se emplean las secuencias "... zumbador, respuesta del animal, alimento..."; en el del primero, el valor de la variable

"alimento" *dependía de la respuesta del animal,* pues si éste volvía la cabeza hacia la izquierda el valor de tal variable era "nada de zanahoria", mientras que si la volvía a la derecha era "trozo de zanahoria"; pero en los de Pávlov se determinaba de antemano, *antes de empezar la sesión,* la naturaleza de todos los estímulos que habrían de actuar durante ésta; por consiguiente, estos últimos experimentos no permiten que la variable "comportamiento del animal" ejerza efecto sobre la "cantidad de alimento ofrecido", luego no existen ni circuito funcional ni realimentación.

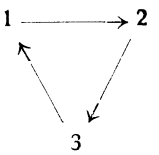
Puede pensarse que la distinción que acabamos de hacer (que corresponde a la de Hilgard y Marquis entre "condicionamiento" y "aprendizaje instrumental") es puramente verbal; pero ello no es así, puesto que la descripción anterior muestra que examinando la estructura del experimento puede distinguirse entre ambos tipos de modo objetivo.

Vemos, por consiguiente, que la situación de "adiestramiento", "instrucción" o "doma" implica que el "domador" — u otro dispositivo análogo — forme parte del sistema conjunto, que está dotado de realimentación:

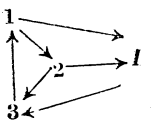
Supongamos ahora que este sistema sea ultraestable, y veamos cuál será su comportamiento en este supuesto. Naturalmente, asumiremos que los mecanismos de escalón están confinados al animal, tanto porque el "domador" o instructor humano puede reemplazarse en algunos experimentos por un dispositivo tan sencillo como una lámina de vidrio (en el ejemplo del lucio), como porque es preciso que las reglas del adiestramiento o instrucción se decidan de antemano (tal como ocurre, por ejemplo, cuando decidimos castigar al perro que tenemos en casa siempre que se suba a una silla), de suerte que son invariantes a lo largo de todo el proceso. Supongamos, pues, que siempre que el perro salte a una silla sus receptores sensoriales sufran una estimulación excesiva; por tratarse de un sistema ultraestable, los valores de las funciones escalonadas que lleven a saltar sobre sillas estarán seguidos por estimulaciones propias para hacer que cambien de valor, pero cuando aparezca un conjunto de funciones escalonadas que conduzca a quedarse en el suelo no se producirán aquellas estimulaciones, y los valores se conservarán (la cesación de castigos cuando aparezca

la actuación debida no es menos importante en el adiestramiento que su administración tras la indebida).

8/9. Veamos este mismo proceso en el homeóstato. Tenemos un ejemplo en la figura 8/9/1, que corresponde al enlace de tres unidades formando sistema:



al cual se enlazaba, además, un "domador" o "instructor" (que era yo mismo), cuya regla de actuación consistía en forzar 3 hasta una posición extrema en caso de que el homeóstato no respondiera a un movimiento impuesto a 1 por un movimiento de 2 en sentido *opuesto;* por consiguiente, en realidad el diagrama de efectos inmediatos era el siguiente:



(Adviértase que parte de la realimentación del sistema pasa por *I.*)

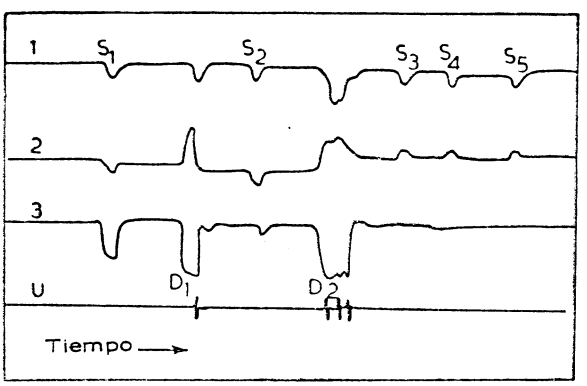


FIGURA 8/9/1. — Tres unidades en interacción. El operador impone los trazos hacia abajo de S; si 2 responde con otro movimiento hacia abajo, el "instructor" fuerza a 3 a introducirse en la superficie crítica.

En S_1 se desplazó 1, y 2 se movió en la misma forma; pero se trataba de la respuesta "prohibida", de modo que el instructor obligó

(en D_1) a 3 llegar a una posición extrema: entonces los mecanismos de escalón cambiaron de valor; en S_2 se sometió de nuevo a prueba el homeóstato, y como volvió a dar una respuesta prohibida se forzó una vez más a 3 (en D_2) a llegar hasta una posición de desvío máximo; en S_3 se repitió la prueba, pero entonces se movió del modo que se quería, por lo cual no se obligó a 3 a desplazarse. En S_4 y S_5 el homeóstato siguió ostentando la reacción que se buscaba.

A partir de S_1, el comportamiento de *I* está en todo momento determinado, de modo que el sistema contituído por 1, 2, 3, *I* y los uniselectores se encuentra determinado por estados.

Conviene no descuidar otra propiedad del sistema total: cuando se produce el movimiento combinado "1 y 2 en movimiento del mismo sentido", *I* se ve obligado, por las reglas del experimento, a forzar a 3 fuera de la región limitada por los estados críticos. Ahora bien, lo que diríamos de cualquier sistema inanimado que se comportara de este modo es que la línea de comportamiento procedente del punto en que habían empezado a moverse 1 y 2 era inestable; por tanto, decir, en términos psicológicos, que el "instructor" ha castigado al "animal" equivale a decir, en los nuestros, que el sistema tiene un conjunto de valores de los parámetros que lo convierten en inestable.

En general, pues, podemos identificar el comportamiento del animal en el "adiestramiento" o "instrucción" con el del sistema ultraestable que se adapta a otro de características prefijadas.

8/10. ¿Cómo se comportará el sistema ultraestable en caso de que se tenga que adaptar a dos medios que alternen entre sí? Se trata de una situación nada infrecuente: el pájaro capaz de bucear ha de adaptarse a situaciones propias del agua y a otras de la tierra; los pájaros británicos tienen que adaptarse tanto al follaje estival como a las desnudas ramas del invierno, y el gatito necesita adaptarse, por una parte, al ratón que trata de evadirse por un agujero y, por otra, al pájaro que quiere escapar volando.

Tales casos equivalen (por lo dicho en los apartados 6/3 y 7/20) a aquél en que exista un medio afectado por un parámetro que pueda tomar dos valores: cada uno de éstos configura de un modo al medio (con tal de que se mantenga el tiempo suficiente para que puedan manifestarse los comportamientos característicos de la adaptación), o, si queremos, podemos considerar que se trata de dos medios. Por consiguiente, cabe realizar nuestras inquisiciones acerca de la cuestión permitiendo que el homeóstato se adapte en presencia de un parámetro

alternante, cada uno de cuyos valores persista el tiempo suficiente para que el paso al otro no interrumpa el proceso de ensayo y error.

Hagamos que el homeóstato se encuentre parcialmente mandado por uniselector y parcialmente a mano, y pongámoslo en funcionamiento como sistema ultraestable. Elijamos ahora un conmutador-inversor e invirtamos periódicamente la polaridad, inversión que introduce el equivalente de los dos medios que alternen. En estas condiciones, podemos predecir que el aparato *elegirá los campos que den lugar a adaptación a ambos medios* (pensemos en qué campo puede ser defi-

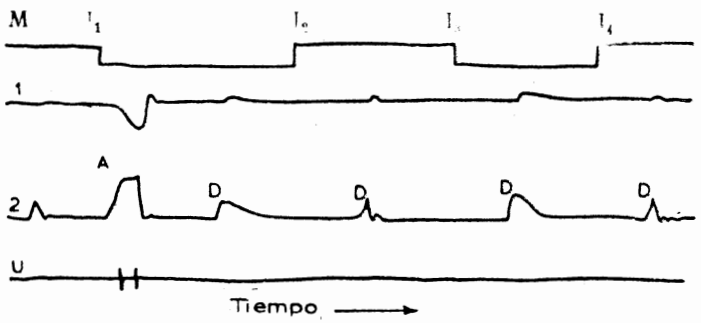


FIGURA 8/10/1. — Gráfica del comportamiento del homeóstato cuando se invierte periódicamente (en los puntos *I*) un conmutador-inversor, *M*. El primer conjunto de valores que proporciona estabilidad para ambas posiciones del inversor es el definitivo.

nitivo: uno que lo sea solamente para uno de los valores del parámetro se perderá con el siguiente cambio de valor de éste, mientras que el que lo sea para ambos valores se conservará). En la figura 8/10/1 se representa gráficamente este proceso: el conmutador-inversor mandado a mano, *M*, se accionó en I_1, I_2 I_3 e I_4; al principio, el cambio de valor correspondiente dió origen a uno de campo, que puede verse en *A;* pero la segunda posición del uniselector resultó llevar a un campo que conservaba la estabilidad con ambos valores de *M*; por ello, a partir de este momento los cambios de *M* no produjeron cambios en los mecanismos de escalón. Las respuestas del sistema a los desplazamientos *D*, obligados por el operador, indican que es estable para ambos valores de *M*; y la diferencia de comportamientos correspondiente a estos dos valores hace ver que los dos campos son distintos.

Así pues, el sistema ultraestable elige valores de los mecanismos de escalón que proporcionen estabilidad para ambos valores de un parámetro alternante.

8/11. ¿Qué sucederá si se enfrenta al homeóstato con un medio desacostumbrado? Pero antes de contestar a tal pregunta es menester que nos pongamos en claro respecto del significado de este último término.

En 6/2 vimos que sobre todo sistema dinámico actúa un número infinitamente grande de parámetros, muchos de los cuales se dan por supuestos, puesto que adoptan siempre valores conocidos, "obvios"; así, en los sistemas mecánicos se admite (salvo mención en contrario) que los cuerpos tienen carga electrostática nula; en los experimentos fisiológicos, que los tejidos no contienen ningún alcaloide desacostumbrado (excepto si se indica que no es así), y en los biológicos que el animal está sano (a menos que se indique lo contrario). Todos estos parámetros, sin embargo, son efectivos en cuanto que las variables no habrían seguido la misma línea de comportamiento en caso de que sus valores hubieran sido diferentes; con lo que es evidente que el campo de los sistemas determinados por estados no depende tan sólo de los parámetros que se hayan fijado individual y específicamente, sino de un gran número de ellos fijados incidentalmente.

Mas el sistema ultraestable se encamina hacia un campo definitivo que sea estable en conjunción con *todos* los valores de los parámetros del sistema (cosa que está muy clara, pues carece de importancia que los parámetros se encuentren o no en sus valores "acostumbrados"). Por consiguiente, este sistema dará lugar siempre a un conjunto de valores de los mecanismos de escalón que se encuentre de tal manera relacionado con el conjunto concreto presente de valores de los parámetros que, *en conjunción con estos valores,* el sistema sea estable: si los parámetros tienen valores desacostumbrados, los mecanismos de escalón acabarán teniendo valores que los compensarán, y tan desacostumbrados como ellos. A los ojos del observador ocasional puede ser sorprendente este ajuste de los valores de dichos mecanismos; pero ahora podemos ver que es inevitable.

Puede hacerse patente este hecho con el homeóstato. Después de haber construído esta máquina se le impusieron ciertas complicaciones "desacostumbradas" (en el sentido de que no se había pensado en ellas durante el período de construcción), y se la sometió a prueba, para ver cómo lograría llegar a un campo estable cuando se encontrara en estas condiciones. Uno de los ensayos se realizó uniendo los dos imanes delanteros con una fina fibra de vidrio que los obligaba a moverse juntos. En la figura 8/11/1 puede verse una gráfica típica de los cambios acontecidos: se enlazaron tres unidades, que al principio daban un sistema estable, como indica la respuesta al desplazamiento del imán 1 en D_1 (desplazamiento ejecutado por el operador);

luego se unieron los imanes de 1 y 2 de forma que sólo podían moverse juntos, y el resultado de tal imposición fué que el sistema pasó a ser inestable; pero la inestabilidad suscitó unos cambios tales en el mecanismo de escalón que el aparato llegó a un nuevo campo defi-

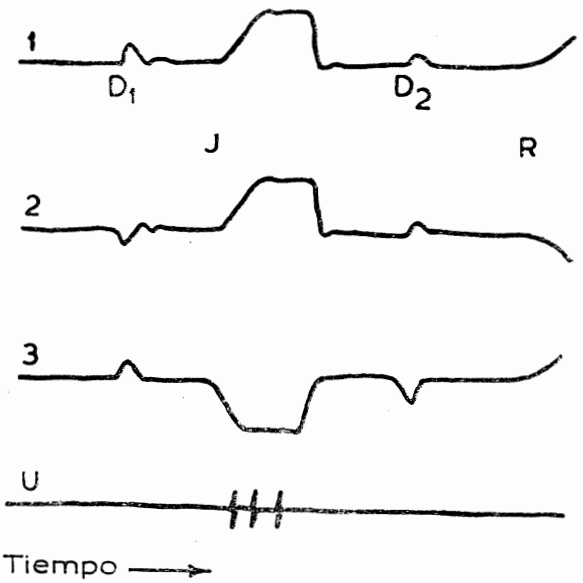


FIGURA 8/11/1. — Interacción de tres unidades. En *J* se obligó a las unidades 1 y 2 a moverse juntas, y el sistema llegó a nuevos valores del mecanismo de escalón que permitieron alcanzar estabilidad (ésta se produce en conjunción con la imposición, ya que cuando se elimina ésta, en *R*, el sistema se convierte en inestable).

nitivo (el cual era, desde luego, estable, como quedó de manifiesto en su respuesta al desplazamiento que el operador ejecutó en D_2). Mas debe notarse que el nuevo conjunto de valores del mecanismo de escalón estaba ajustado a la imposición dicha (o "se dió cuenta" de ella), hasta el punto de que, en realidad, la utilizaba para mantener la estabilidad; pues cuando el operador, en *R*, retiró suavemente la fibra, el sistema se convirtió en inestable.

Naturalmente, el repertorio del homeóstato no basta para resolver otros problemas asimismo desacostumbrados: un "problema" de este tipo consistiría en colocar a un lado un electroimán lo suficientemente enérgico como para desviar completamente hacia él todos los imanes; análogamente ocurriría si cortocircuitásemos el relevador *F* (de la figura 8/2/3). En semejantes situaciones ni el homeóstato ni ningún otro sistema ultraestable podrían llegar a un estado de equilibrio, y, por

ello, no lograrían adaptarse; y lo mismo ocurriría a un organismo vivo si se le enfrentase con un problema para el cual su repertorio no tuviese ninguna solución.

Algunos fallos aparentes

8/12. Veremos que el principio de la ultraestabilidad, tal y como lo hace patente el homeóstato, no parece representar adecuadamente toda la riqueza de adaptaciones que los animales superiores han adquirido (más adelante nos ocuparemos de los aspectos en que la representación es imperfecta). Sin embargo, algunos de los "fallos" del sistema ultraestable resultan servir, cuando se los examina más de cerca, de verdadero apoyo a la tesis de que el cerebro viviente se adapta en virtud de su ultraestabilidad. Vamos a estudiarlos en los apartados que siguen.

8/13. Si no se cumple la relación indicada en 7/5 entre las variables esenciales y los mecanismos de escalón, esto es, si las superficies críticas del sistema ultraestable no se encuentran en la relación debida con los límites de aquellas variables, el sistema puede buscar una meta no apropiada, o puede dejar de emprender acciones correctivas cuando las variables esenciales se encuentren en una proximidad de sus límites muy peligrosa.

Aun cuando no podemos decir mucho acerca de los estados críticos de los animales, es posible observar en ellos fallos de adaptación que pueden muy bien deberse a defectos de este tipo. Así, si bien suelen reaccionar defensivamente frente a tóxicos como la estricnina —ya que tiene un sabor amargo fortísimo, estimula enérgicamente las papilas gustativas y, por consiguiente, se la escupe en seguida—, se encuentran característicamente inermes frente a venenos sin sabor o sin olor; y ello justamente porque no estimulan excesivamente ninguna fibra nerviosa, y no originan desviación alguna de la rutina de la masticación y la deglución.

Otro ejemplo aún más impresionante, que hace ver lo indefenso que se encuentra el organismo vivo si el dolor no produce su efecto normal de originar cambios de comportamiento, es el de los niños carentes de modo congénito de los reflejos de autoconservación normales. Boyd y Nie han descrito un caso de esta índole; se trataba de una niña de siete años, que parecía sana y normal a todos respectos, salvo por carecer totalmente de sensibilidad dolorosa; ya antes del

año de nacer sus padres notaron que no lloraba al hacerse una herida; cuando tenía un año se dieron cuenta de que tenía un brazo doblado, y se vió mediante rayos X que había sufrido recientemente una fractura-dislocación, pero la criatura no se había quejado, ni dió muestra alguna de dolor cuando le encajaron los trozos en su sitio sin anestésico; tres meses después tuvo el mismo accidente en el codo izquierdo; en la playa se arrastraba sobre las rocas hasta que se le destrozaban y despellejaban enteramente las manos y las rodillas; y en varias ocasiones su madre notó olor de chamusquina y se encontró a la niña apoyada tranquilamente en la cocina encendida.

Parece, pues, que si un sistema ultraestable imperfectamente formado está indefenso en ciertas condiciones, análogamente puede estarlo un organismo con defectos de formación.

8/14. Por lo regular, incluso en caso de que el sistema ultraestable tenga la constitución apropiada —es decir, que se alcancen los estados críticos antes de que las variables esenciales lleguen a sus respectivos límites— no es capaz de adaptarse a medios que se comporten con discontinuidades súbitas. En los ejemplos que hemos presentado de adaptación del homeóstato con éxito, las acciones eran siempre continuas; mas supongamos que el aparato mandase un relevador que normalmente permaneciera sin modificaciones pero que, en caso de que el homeóstato pasara por un estado elegido arbitrariamente, dejase libre un resorte muy poderoso que apartase los imanes de sus direcciones centrales "óptimas"; suponiendo que aconteciera al aparato estar acercándose a este estado especial, no tomaría medida alguna para sortearlo, y de este modo suscitaría ciegamente la "letal" acción. Por tanto, el método de lograr la adaptación que emplea el homeóstato es fundamentalmente inútil cuando su medio tiene estas discontinuidades "letales".

Sin embargo, el organismo vivo es muy capaz de fallar ante exactamente el mismo tipo de medio: el lucio que chocaba con el tabique de vidrio cuando quería engullir los peces blancos no era capaz, al principio, de evitar el golpe, precisamente debido al carácter súbito de la transición entre no ver el vidrio y sentir el impacto en el hocico. Y, en realidad, el cazador ha sabido desde hace muchísimo tiempo esta imperfección de la defensa del organismo vivo, y ha sacado partido de ella: los movimientos del gato en acecho son tales que permiten mantener durante el mayor tiempo posible, a los ojos de la presa, la apariencia de un paisaje pacífico, que cambiará con la máxima subitaneidad posible en otro mortalmente amenazador (el carácter re-

pentino es esencial en este proceso); pensemos asimismo en los rasgos esenciales de cualquier trampa eficaz, y en la necesidad, cuando se quiere envenenar animales dañinos, de que la primera dosis sea letal.

Por consiguiente, si bien el sistema ultraestable suele fracasar en su tentativa de adaptarse a un medio que encierre discontinuidades bruscas, lo mismo le ocurre al organismo vivo.

8/15. Otro de los puntos débiles del método del sistema ultraestable consiste en que el éxito depende de que el sistema interponga un período de dilación apropiado entre cada dos pruebas; así, el sistema de la figura 7/23/1 tiene que persistir en la prueba número IV durante el tiempo suficiente para que el punto representativo se aleje de la región de los estados críticos. En realidad, una dilación extremada, tanto en uno como en otro sentido, puede ser fatal: lo mismo si se pasa demasiado apresuradamente de ensayo a ensayo, sin dar tiempo a que se llegue a tener éxito, que si se prolonga excesivamente una prueba equivocada, que puede originar daños de mucha gravedad. Es evidente que la duración óptima de la prueba es igual al tiempo que necesita la información para pasar, a través del medio, desde los mecanismos de escalón, que inician la prueba, hasta las variables esenciales, en las que se manifiesta el resultado. Y si el sistema de que hablamos requiere un ajuste de la duración, igualmente le sucede al organismo vivo; pues apenas puede caber duda de que muchos de éstos habrán fracasado, ya sea por abandonar demasiado velozmente el intento como por persistir demasiado tiempo en una prueba que, en realidad, fuese infructuosa. (Volveremos sobre esto en 17/10).

De modo que el sistema ultraestable y el organismo vivo se encuentran frente a la misma dificultad.

8/16. Si ordenamos de acuerdo con lo arduos que sean los medios en que se pueda encontrar un sistema ultraestable, veremos que en el extremo "fácil" se encuentran los que constan de unas pocas variables independientes entre sí, y en el "difícil" los que constan de muchas variables enlazadas unas con otras de modo múltiple, formando un todo sumamente complejo (nos ocuparemos de esta cuestión a partir del capítulo XI).

El organismo vivo clasificaría también los medios en que se encuentre, en lo esencial, de la misma manera: ello no es sólo algo que la experiencia corriente nos hace ver constantemente, sino que la preparación y empleo de las "pruebas [*tests*] de inteligencia" ha puesto

de manifiesto de mil formas que los problemas fáciles son los que tienen pocas componentes e independientes entre sí, mientras que los difíciles tienen muchas entreveradas en un conjunto complejo; así pues, lo probable es que el sistema ultraestable y el organismo vivo fracasen juntos cuando se los enfrente con medios de diversos grados de "dificultad".

8/17. En los últimos apartados hemos visto, de distintos modos, que varias "ineptitudes" del sistema ultraestable nos han hecho percatarnos, tras un escrutinio más de cerca, de que no es sólo tal sistema el que las posee, sino el cerebro viviente también. Es claro que debemos guardarnos de condenar un modelo por carecer de cierta propiedad hasta que estemos seguros de que el organismo vivo la presenta realmente.

Desde que este libro se publicó [en inglés] por primera vez, se me han puesto frecuentemente objeciones de la forma: "desde luego, un sistema ultraestable no podría..."; pero cuando se va al fondo de la cuestión, es sorprendente el número de veces que la contestación es: "no, no podría, pero un ser humano tampoco".

La ultraestabilidad del organismo

9/1. En los primeros apartados del capítulo VII prestábamos atención a los hechos elementales del comportamiento de un gatito que se adaptaba, y los poníamos en relación con una construcción teorética mecanística, el sistema "ultraestable". En el presente capítulo vamos a considerar algunas otras relaciones elementales entre el organismo real y dicha construcción teorética; pararemos mientes, en particular, en lo que pueda decirse acerca del sencillo sistema teorético de la figura 7/5/1: ¿en qué medida corresponde al organismo y al medio reales? Hemos de proceder con precaución, pues la experiencia ha hecho ver lo fácil que es saltar a unas conclusiones burdamente erróneas.

9/2. Tenemos que guardar una precaución especial para no dar por supuesto que un diagrama de efectos inmediatos — el de la figura 7/5/1, por ejemplo — nos proporciona una imagen de lo que haya de *verse* en el sistema nervioso: del mismo modo que una "máquina" real puede dar origen a una gran variedad de sistemas, puede asimismo ser punto de partida para una gran variedad de diagramas de efectos inmediatos en caso de que el experimentador la estudie con gran número de métodos técnicos diferentes. Una red eléctrica puede ofrecernos unos diagramas de conexión funcional sumamente diversos si se la explora primero con potenciales que varíen lentamente y luego con otros que oscilen con alta frecuencia. Hay ocasiones en que dos técnicas dan lugar al mismo diagrama — la exploración de una red eléctrica primeramente mediante corrientes continuas y después, digamos, por medio del sentido del tacto —: cuando tal cosa sucede somos felices, pues podemos contar con una simplificación, pero no hemos de esperar que ocurra siempre así.

Muchos cuerpos sencillos poseen un diagrama tan notorio que uno tiende a pensar que constituye *la* especificación del modo de estar enlazadas sus partes: ello acontece con el diagrama formado al considerar la posición de éstas en el espacio tridimensional y al estudiar

cómo se mueve cada parte cuando lo hace otra cualquiera. De esta manera (empleando semejante método exactamente de igual modo que el del apartado 4/12), lo mismo el científico que el hombre de la calle se forman idea de cómo están vinculadas las cosas en el sentido material sencillo, o anatómico: así aprende el niño que cuando alza un extremo del sonajero el otro se levanta también, y el demostrador de anatomía hace ver que cuando se tira de cierto tendón del antebrazo se mueve el dedo pulgar. Estas operaciones bastan para especificar un diagrama de efectos inmediatos, o estructura de conexiones, que es común a muchísimas cosas y tiene gran importancia; pero hemos de cuidarnos mucho de pensar que sea la única estructura posible, pues existen también sistemas cuyas partes o variables no están en ninguna posición espacial relativa peculiar, pero que se encuentran en relación dinámica de modo enteramente distinto. Así ocurre cuando en un matraz hay una mezcla de substratos, enzimas y otras substancias, siendo las variables *concentraciones*: entonces el "sistema" es un conjunto de concentraciones, y el diagrama de efectos inmediatos hace ver que se afectan unas a otras; pero semejante diagrama no muestra nada que sea visible en la distribución espacial de la materia, sino que es puramente funcional. Nada de lo dicho hasta ahora excluye la posibilidad de que la figura 7/5/1, que parece anatómica, pertenezca a este último tipo; hemos de avanzar, por tanto, con circunspección.

9/3. La principal parte de tal figura que pide un comentario es la realimentación procedentes del medio y que, pasando por las variables esenciales, acaba en la parte que reacciona, *R*; si bien apenas necesitamos ocuparnos del canal que conduce del medio a estas variables, ya que dependerá de los detalles prácticos propios de las circunstancias concretas en que, en el instante que sea, se encuentre el organismo en su vida libre.

Las variables esenciales, que están determinadas por la estructura de los genes (cf. 3/14), suelen tener una localización anatómica sencilla: algunas de ellas, por ejemplo, se encuentran localizadas, como es sabido, en la médula oblonga, y de otras (tales como las señales de dolor) sabemos que pasan por ciertos lugares del mesencéfalo y del tálamo óptico. Para identificar estas variables con mayor precisión basta sólo realizar estudios más detallados.

Los mecanismos de escalón en el organismo

9/4. Con los mecanismos de escalón ocurre algo muy distinto: actualmente no tenemos idea, en realidad, de dónde podríamos buscarlos ni de qué es lo que habríamos de buscar. En estas cuestiones hemos de ser muy cautos para no hacer supuestos sin darnos cuenta, pues la gama de posibilidades es amplísima.

Tenemos que cuidarnos mucho, por ejemplo, de no preguntar dónde se encuentran, pues tal pregunta supone que tienen que estar en algún sitio, y el "sitio" puede muy bien interpretarse anatómicamente, histológicamente o de cualquier otro modo que no sea apropiado para semejantes variables. Algunas máquinas calculadores, por ejemplo, almacenan datos en forma de tren de impulsos que circula por un camino cíclico en el que se halla intercalada una larga columna de mercurio; allí cada impulso se comporta como una función escalonada que tiene sólo dos valores, presencia y ausencia: *está* localizada por su posición en tal sucesión, pero *no* lo está en ninguna parte determinada de la columna (tal es, asimismo, el tipo de "localización" que las rayas de Fraunhofer tienen en la luz solar que llega hasta nosotros: ocupan un lugar definido en el espectro, pero no un lugar único en el espacio tridimensional).

Una vez hechas todas estas advertencias pasaremos revista brevemente a algunas de las posibilidades. (Se trata de una lista que, casi con entera certidumbre, no es completa, y por el momento tiene la máxima importancia que estemos sobre aviso para darnos cuenta de formas aún no tomadas en consideración.)

9/5. Hace tiempo que Young sugirió que un circuito cerrado de neuronas podría conservar un flujo de impulsos y mantenerse a sí mismo en semejante estado excitado: sin excitaciones permanecería en reposo, y excitado poseería una actividad máxima, de suerte que tal sistema podría conservar en forma permanente los efectos de un acontecimiento.

Lorente de No ha aportado testimonios histológicos abundantes de que las neuronas no forman solamente cadenas, sino circuitos (la figura 9/5/1 se ha tomado de uno de sus trabajos); éstos son tan frecuentes que ha enunciado una "ley de reciprocidad de las conexiones": "si un complejo de células, *A*, envía fibras a una célula o complejo de células, *B*, *B* envía asimismo fibras a *A*, ya sea directamente, ya mediante una neurona internuncial".

Cuando se excita un circuito sencillo, o bien tiende a caer de nuevo en un estado de excitación nula (en caso de que el factor de amplificación sea menor que la unidad) o a alcanzar la excitación máxima (si es mayor que la unidad); un circuito de este tipo tiende a mantener solamente dos grados de actividad, el inactivo y el máximo; por consiguiente, su actividad tendrá forma de función escalonada si podemos despreciar el tiempo que necesite la cadena para llegar hasta la excitación máxima, y sus estados críticos serán la mínima excitación

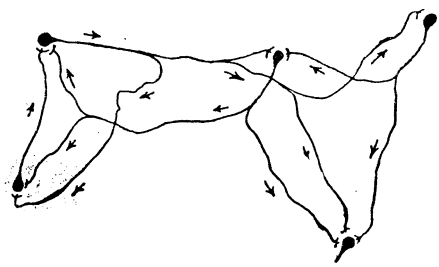


FIGURA 9/5/1. — Neuronas y conexiones entre ellas del arco reflejo trigeminal. (Semi diagramático; tomado de Lorente de No.)

capaz de despertar su actividad máxima y la mínima inhibición capaz de detener ésta (McCulloch ha denominado "endromas" a tales circuitos y ha estudiado algunas de sus propiedades.)

9/6. En caso de que las neuronas sean ameboides, de suerte que los procesos correspondientes puedan hacer que se establezcan o se interrumpan contactos con otras células, tendríamos otra fuente de funciones escalonadas.

Desde las primeras observaciones al respecto de Harrison se sabe que las células nerviosas son ameboides en cultivos de tejidos: cuando se cultiva tejido nervioso en plasma coagulado, crecen filamentos hacia el exterior a razón de unos 0,05 mm por hora; el filamento termina en un extremo abultado, de 15×25 μ aproximadamente, que posee una actividad ameboide, emitiendo continuamente pseudópodos como si explorase el medio en derredor suyo. Levi ha estudiado por microdisección cultivos tisulares, en los que podían estimularse células individuales, y ha observado que cuando se toca con la punta de una aguja finísima una célula nerviosa, hay veces en que ésta empieza a emitir prolongaciones con un movimiento ameboide.

Las condiciones existentes en los cultivos de tejidos son algo anor-

males, y es frecuente encontrar artefactos *; pero no puede oponerse esta objeción a los trabajos de Speidel, que ha observado en la cola del renacuajo vivo el crecimiento de fibras nerviosas, cuyas extremidades, como las del cultivo citado, poseían una actividad ameboide (más tarde ha comprobado los efectos del metrazol con la misma técnica, y ha visto que primero se producía una fuerte retracción y luego una reextensión). Más recientemente, Carey y otros han estudiado las placas terminales motoras, y han advertido que también son ameboides, ya que se contraen hasta formar una bola después de una lesión.

Acaso la más antigua de las reacciones ante un estímulo sea la de efectuar un movimiento ameboide; así pues, la hipótesis de que las nauronas son ameboides sólo asume que no han llegado a perder esta propiedad originaria; y, por consiguiente, es posible que de este modo se introduzcan algunas funciones escalonadas.

9/7. Toda célula tiene muchas variables que podrían cambiar siguiendo aproximadamente la forma de una función escalonada, especialmente si la duración de la observación es grande comparada con el tiempo medio que tarden en producirse los acontecimientos celulares: películas monomoleculares, soluciones proteicas, sistemas enzimáticos, concentraciones de hidrógeno y de otros iones, potenciales de oxirreducción, capas adsorbidas y otros muchos constituyentes podrían actuar como mecanismos de escalón.

Si la célula es lo suficientemente sensible para que la afecten cambios de magnitud atómica, los cambios [inducidos] podrían tener forma de función escalonada, pues aquéllos pueden producirse sólo por saltos cuánticos. Sin embargo, es probable que ello no dé lugar a tales funciones, ya que los cambios de la magnitud indicada serán seguramente demasiado indeterminados para que puedan dar origen al comportamiento regular y reproducible a que nos atenemos en este libro (cf. 1/14).

Rodeando la neurona y, en especial, sus dendritas y axón, hay una membrana muy sensible que podría ser asiento de funciones escalonadas, si bien probablemente está por entero dedicada a la transmisión de los potenciales de acción. Hace muchos años que se vienen describiendo las "neurofibrillas", aun cuando no puede descartarse la posi-

* Palabra que tiene en este libro el sentido (muy frecuente en histología) de elemento, rasgo u objeto no existente en el ser vivo de por sí, sino debido — involuntariamente, desde luego — al observador en su empleo de las técnicas de estudio, tales como tinción, endurecimiento, etc. (*N. del T.*)

bilidad de que se trate de un artefacto; en caso de que sean reales, la extrema delicadeza de su estructura sugiere que podrían comportarse dando funciones escalonadas.

Se ha hecho notar en muchas ocasiones la delicadeza del sistema nervioso, que salta a la vista en todas sus partes; lo cual implica, sin duda, la existencia de funciones escalonadas, ya que la propiedad de ser "delicado" difícilmente puede significar otra cosa que "de rotura fácil", y hemos observado en el apartado 7/19 que el fenómeno de "romperse" algo es la expresión de un cambio de valor en una función escalonada; aunque este argumento es en gran medida verbal, justifica algo la opinión de que los mecanismos de escalón no son improbables, en modo alguno, en el sistema nervioso.

> "La idea de un desarrollo permanente y continuo — decía Jacques Loeb — no es compatible con las cualidades físicas generales del protoplasma o del material coloidal. Las substancias coloidales de nuestro protoplasma poseen puntos críticos... Los coloides cambian de estado con gran facilidad, y gran número de condiciones... son capaces de originar en ellos un cambio de estado. Este material es sumamente propenso a una serie discontinua de cambios."

¿Tiene la memoria una base molecular?

9/8. ¿Qué es necesario para que una entidad material sirva de mecanismo de escalón al servicio de la ultraestabilidad? Unicamente que se trate de un mecanismo de escalón que sea susceptible de cambiar por efecto de las variables esenciales y que actúe de modo eficaz sobre la parte que reacciona, *R*.

En cuanto a sistema dinámico, el cerebro es enormemente sensible, y constituye un amplificador tan poderoso que apenas podemos fijar ningún límite a la pequeñez de los cambios físicos que sigan teniendo un efecto importante en el comportamiento. Ni siquiera podemos desdeñar como ineficaz una variación acaecida en una sola molécula, pues hay muchos acontecimientos del sistema nervioso que dependen de un modo crítico de la relación entre una variable y su umbral, de suerte que en las proximidades de éste un cambio muy pequeño puede tener grandes consecuencias.

Por lo tanto, no es imposible que los sucesos moleculares aporten las funciones escalonadas. Y hay una gran cantidad de tales sucesos que podrían dar origen a funciones de esta forma: el que una molécula se encuentre en el estado *dextrógiro* o en el *levógiro*, en el *cis* o en el

trans; el que exista o no un enlace con un hidrógeno; el que un enlace doble entre carbonos se encuentre en este plano o en aquél, etc. Semejantes bases tendrían la ventaja de proporcionar estas necesarias funciones a un coste mínimo de peso y de volumen, cuestión que tiene considerable importancia para el organismo en vida libre.

Pauling ha debatido estas posibilidades y ha sugerido ciertos límites que permitirían reducir el campo de búsqueda: si la entidad molecular es demasiado pequeña, la agitación térmica impediría que manifestara la constancia que debe tener para que pueda actuar como base de un comportamiento tal como el de los pichones de Skinner (véase 1/14); si fuese demasiado grande, no sería idónea para el milagro de "miniaturización" que realmente se ha conseguido con el cerebro del mamífero.

9/9. Cuando retenemos todas estas formas posibles de mecanismos de escalón nos es difícil decir algo verdaderamente definido acerca de los canales de realimentación que, partiendo de la variable esencial y a través de un mecanismo de este tipo, lleven a la parte que reacciona, *R*, de la figura 7/5/1. Es evidente que no existe la menor *necesidad* de que semejantes canales consistan en conductos anatómicos o histológicos: pues, en caso de que los mecanismos de escalón fuesen moleculares, el canal conducente *hasta* ellos podría ser de naturaleza química u hormonal, mientras que el que, *desde* ellos, condujera a *R*, podría ser extraordinariamente corto y casi de cualquier índole, en caso de que se encontrasen asentados *en el interior* de las neuronas sobre las que ejercieran su influjo.

Es evidente que necesitamos saber muchas más cosas antes de que podamos identificar con precisión esta parte de la realimentación de segundo orden. Pero lo que más importa por el momento es que evitemos dar por supuestas, sin darnos cuenta, cosas que no se hayan hecho patentes todavía.

¿Son necesarios los mecanismos de escalón?

9/10. Desde el apartado 7/12 venimos estudiando la adaptación en el caso de que las variables que afecten a la parte que reacciona, *R*, de la figura 7/5/1 se comporten como funciones escalonadas. Allí justificamos tal proceder diciendo que se trataba de un caso teoréticamente central, en virtud de su especial sencillez y claridad, de modo que, incluso si el sistema nervioso no contuviera mecanismos de este tipo, para

estudiar esta cuestión sería de mucha ayuda atender a él, ya que así se facilita una captación clara de cómo puede adaptarse un sistema nervioso. Pero, ¿no hay ninguna justificación de más peso que ésta? ¿*Demuestran*, acaso, los datos que tenemos, que el proceso de la adaptación implica la existencia de mecanismos de escalón?

9/11. Hemos visto ya (apartado 7/16) que ni siquiera de un mecanismo tan típico como el relevador de telegrafía podemos decir que *sea* (incondicionalmente) un mecanismo de escalón, ya que ciertas maneras de observarlo (*v. gr.*, cada microsegundo o cada año) no manifiestan que tenga esta forma, y no existe ninguna manera especial de observar que pueda reivindicar una prioridad absoluta. Así pues, incluso aunque un objeto situado en un "elemento opaco" ofreciera pruebas convincentes de ser un relevador del tipo dicho, el observador no podría pretender que el objeto real correspondiente era incondicionalmente un mecanismo de escalón.

9/12. Por otra parte, la función escalonada tiene, en comparación con la función total, una sencillez de comportamiento notable, y no cabe que cualquier objeto real pueda manifestar semejante sencillez. Por consiguiente, decir, de un objeto situado en el interior de un elemento opaco, que *puede* ostentar un comportamiento del tipo propio de las funciones escalonadas, es decir algo incondicionalmente verdadero acerca de él.

Repitámoslo: si se estudia un sistema de tres variables y resulta dar origen a un campo tal como el de la figura 7/20/1 (en el que las tres dimensiones posibles se han reducido a dos planos, bidimensionales), el observador puede pretender que ha hecho patente algo especial, en el sentido de que los campos totalmente tridimensionales (por ejemplo, el de la figura 3/5/2) son imposibles de reducir a aquella sencilla forma.

Así pues, ciertos comportamientos, si bien no permiten deducir que se deban a algo que *sea* un mecanismo de escalón pueden, pese a ello, autorizar la deducción de que se deben a cierta entidad dotada de la especial propiedad de que *es posible* reducir su comportamiento a la forma de una función escalonada — afirmación plena de sentido, puesto que no todas las entidades dan lugar a un comportamiento así reductible.

9/13. ¿Qué ocurre con el sistema nervioso? Si las variables de *S* (de la figura 7/5/1) variasen como funciones totales, el observador podría ver solamente un sistema sumamente complejo moviéndose a lo largo

de una compleja trayectoria continua hasta llegar, finalmente, al equilibrio. Sin embargo, a menudo lo que observa es que el organismo "se pone a ensayar", esto es, se comporta de una forma determinada y *persiste* en ella durante un tiempo apreciable; luego abandona este ensayo y aparece un nuevo modo de comportarse, que se mantiene asimismo durante un tiempo apreciable; y así sucesivamente.

Cuando ocurre tal cosa, el observador puede pretender con toda justicia que el sistema no manifiesta toda su entera complejidad: pues el hecho de que, mientras dure el ensayo, persista en *esta* forma particular de ensayar quiere decir que se está produciendo cierta redundancia; y ésta es análoga a la de una sucesión de letras tal como, por ejemplo,

FFFFFLLLLLLLTTTTTJJJJJJJ,

en lugar de otra de entera variedad:

EJYMSNASGCGGHLAAPEYPJVRQJ.

Cada ensayo, a su vez, que manifieste un modo característico de comportamiento definirá un campo; y éstos se seguirán uno a otro en sucesión discreta, como ocurre en la figura 7/23/1. Cuando esto suceda, si el observador quiere asumir que los cambios de un campo se producen en un conjunto determinado por estados, puede deducir legítimamente que los parámetros responsables de los cambios de un campo a otro son de tal naturaleza (y están de tal modo enlazados con las variables principales) que *pueden* representarse mediante funciones escalonadas (pues con funciones totales no sería posible efectuar aquellos movimientos, discretos, de un ensayo a otro distinto). Y el que *puedan* representarse de tal modo constituye una restricción plena de sentido impuesta a su naturaleza.

Si combinamos ahora esta deducción con lo que se ha llamado principio de Dancoff — el de que los sistemas que la selección natural ha hecho eficaces no emplean ni una variedad ni una capacidad de canales que exceda mucho al mínimo —, podemos deducir que cuando los organismos utilizan con regularidad el método de los ensayos, ello inclina fuertemente a presumir (si bien no de modo concluyente) que tales ensayos están regulados por ciertas entidades materiales cuya variedad (relativamente al resto del organismo) no es muy superior a la mínima. Disponemos, por consiguiente, de testimonios poderosamente presuntivos en favor del carácter de funciones escalonadas de las variables pertinentes de *S* (de la figura 7/5/1), y en favor de que

las entidades materiales en que se encuentren encarnadas son de tal naturaleza que ostentan con facilidad dichas formas funcionales.

Niveles de realimentación.

9/14. Podemos examinar ahora qué parecido hay entre lo expuesto en el capítulo VII y en la figura 7/5/1 y la organización real del organismo en lo que respecta a la división de la realimentación en dos órdenes netamente distinguibles: la existente entre organismo y medio a través de los canales sensoriales y motóricos ordinarios y la que pasa por las variables esenciales y los mecanismos de escalón antes de llegar a la parte que reacciona, *R*.

El capítulo citado seguía la estrategia que habíamos descrito en 2/17: pretendíamos llegar a un sistema tipo *perfectamente* claro, que pudiese servirnos de referencia apropiada para muchos sistemas reales que no se correspondan exactamente con él. Para obtener un caso neto suponíamos que se sometía al sistema (organismo y medio enlazados) precisamente a dos tipos distintos de perturbaciones procedentes del exterior. Al primero pertenece una perturbación impulsora de las variables principales del sistema, que desplaza su estado a una posición no de equilibrio (así ocurre si se aparta del centro la aguja del homeóstato, como hacíamos en D_1, en la figura 8/4/1, o si repentinamente se produce una llamarada en el hogar junto al que se encuentre el gatito); si el organismo está adaptado hace patente su adaptación actuando del modo apropiado al nuevo estado; y para someter a contraste y patentizar su adaptación es necesario que acontezca cierto número de tales perturbaciones, cada una seguida de un lapso de tiempo para que pueda aparecer la reacción.

Las perturbaciones en que cambie algún parámetro del sistema (pasando del valor que tuviese durante muchas perturbaciones impulsoras a otro distinto) constituyen el otro tipo. Estas modificaciones guardan una relación con el sistema completamente distinta que las procedentes de impulsos: mientras que éstos permiten que aquél muestre su estabilidad, el cambio de parámetro da ocasión a que (si le es posible) muestre su ultraestabilidad; en tanto que después del impulso el sistema patentiza su capacidad de volver al *estado* de equilibrio, tras el cambio de valor de un parámetro hace patente su capacidad de hacer que el campo (de sus variables principales) vuelva a una *forma* estable. Por tanto, el sistema ultraestable constituye la forma apropiada para el organismo en caso de que las perturbaciones que lo alcancen,

procedentes del mundo en torno suyo, se distribuyan en dos clases netamente definidas:

1) pequeñas perturbaciones impulsoras y frecuentes (o, incluso, continuas) de las variables principales; y
2) cambios ocasionales, en forma de función escalonada, de los parámetros.

Luego el sistema ultraestable no constituye meramente una argucia didáctica: en algunos casos puede ser, en realidad, el mecanismo óptimo mediante el cual pueda un organismo asegurar su supervivencia. *Cuando las perturbaciones que amenazan al organismo tienen, durante muchas generaciones, la forma bimodal que acabamos de describir, podemos esperar que aquél haya adquirido, en virtud de la selección natural, una forma muy próxima a la ultraestable, gracias a haber formado dos realimentaciones fácilmente distinguibles entre sí.*

9/15. No sugerimos ni por un momento que todos los estímulos, perturbaciones y problemas que se presenten naturalmente a los gatitos lo hayan de hacer de la forma puntualmente dicotómica con que los hemos aplicado nosotros al homeóstato; ni tampoco que siempre pueda considerarse ultraestable el cerebro real, con tal de que sepamos encontrar el modo debido de enfocarlo. Por el contrario, solamente cuando estamos de suerte podemos los científicos reducir conceptualmente un sistema complejo a subsistemas manejables, lo mismo que el homeóstato es reductible a la parte continua (con realimentación entre las agujas) y la que varía por escalones (centrada en la segunda realimentación): si existen muchos bucles de retroacción y no hay manera cómoda de individualizarlos, la sencillez se desvanece, y lo único que podemos hacer es considerar el sistema como un todo de gran complejidad (tema de que nos ocuparemos a partir del capítulo XI hasta el final).

La regulación del objetivo

9/16. Los sistemas ultraestables de que hemos hablado hasta ahora, aun cuando poseían diversos campos, perseguían una meta única (el homeóstato buscaba orientaciones centrales y la rata un potencial de la rejilla nulo). En este apartado trataremos de diversos métodos de variar las metas, variaciones que tienen importancia en los casos en que en realidad se persiga una submeta, que se pretenda alcanzar tem-

poral o provisionalmente con vistas a otra meta permanente (cf. 3/15).

Si, por el medio que sea, se altera la distribución de los estados críticos en el espacio de fases de las variables principales, el sistema ultraestable quedará alterado en cuanto a la meta que persiga, ya que este sistema forma siempre un campo que mantiene el punto representativo dentro de la región rodeada por los estados críticos (véase 7/23). Así, en caso de que, por la razón que sea, los estados críticos pasen (figura 9/16/1) de encontrarse alrededor de *A* a hacerlo en torno a *B*,

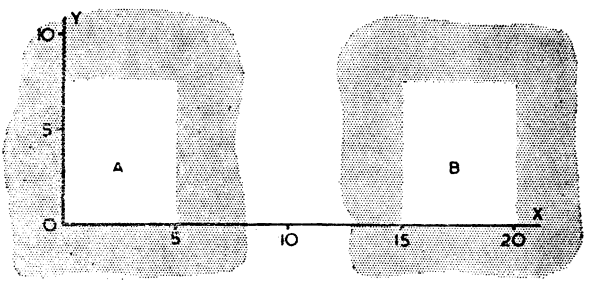


FIGURA 9/16/1.

el campo definitivo pasaría de ser uno en que x se encontraba comprendido entre 0 y 5 a otro con x entre 15 y 20.

En la figura 9/16/2 se representa otro método emparentado con éste. Un sistema ultraestable, *U*, se encuentra en interacción con la variable *A; E* y *R* representan los efectos inmediatos que se ejerzan *U* y *A* mutuamente (a los que podemos considerar, respectivamente, como los efectores y receptores de *U*). En caso de que *A* ejerciese un efecto muy fuerte sobre el sistema ultraestable, éste, naturalmente, llegaría a formar un campo que estabilizaría *A*, y precisamente en un valor que dependería de la acción de *R*. Supongamos, por ejemplo, que todos los estados críticos de *U* se encuentren en uno de los valores 0 y 10, de modo que este sistema elija siempre un campo que estabilice sus variables principales entre estos valores; admitiendo que *R* sea tal que si *A* tiene cierto valor *a*, *R* transmite a *U* el valor $5a - 20$, es fácil ver que *U* llegará a constituir un campo que mantenga a *A* dentro de los valores que difieren de 5 en una unidad: pues si el campo hace que *A* se salga de la gama de 4 a 6, hará que *U* salga fuera del margen de variación de 0 a 10, lo cual acabará con el campo; luego *U* "buscará el valor 5"; admitiendo ahora que *R* pase a

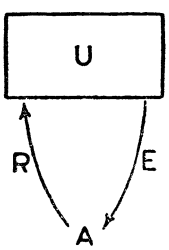


FIG. 9/16/2.

transmitir $5a + 5$ (en lugar de $5a - 20$, como antes), U cambiará de campo hasta que mantenga a A a una distancia de 0 inferior a una unidad, de modo que ahora "buscará el valor 0". Por consiguiente, todo lo que regule el valor de b en $R = 5a + b$, regulará, asimismo. la "meta" buscada por U.

Veamos un ejemplo más práctico: supongamos que U sea móvil y ultraestable, y que sus estados críticos estén fijados de modo que busque circunstancias en las que haya una luminosidad elevada (así ocurriría si tales estados adoptasen una disposición análoga a la de la figura 9/16/1, *B*, en vez de la de la parte *A* de la misma figura); supongamos además que R sea un rayo luminoso; si interponemos en el recorrido de R un filtro rojo, la luz verde se contará, evidentemente, como "oscuridad", de modo que el sistema buscará activamente los lugares de luz roja y evitará los de luz verde; y si ahora meramente reemplazamos el filtro rojo por uno verde, el objetivo total de los movimientos se alterará, ya que lo que buscará después de tal cambio serán los sitios verdes y evitará los rojos.

Supongamos ahora que R es un transductor que convierte la temperatura de A en luz que transmite a U; si la construcción de R es tal que transforme las temperaturas altas de A en iluminaciones fuertes, U buscará activamente lugares calientes, mientras que si se invierte esta relación, lo que buscará serán sitios fríos. Es claro que lo que regule R regula también la meta de U.

Por tanto, no existe, en general, dificultad alguna para dar cuenta del hecho de que un sistema pueda perseguir un objetivo en un momento y otro distinto en otro.

Hay ocasiones en que la modificación, ya sea de los estados críticos o del transductor, R, puede estar mandada por un solo parámetro; en tales casos hemos de distinguir dos clases de complejidades. Supongamos que el parámetro pueda tomar sólo dos valores y que el sistema U sea muy complicado: entonces el sistema [total] es sencillo en el sentido de que sólo buscará una u otra de sólo dos metas, y complicado en el sentido de que buscará la meta que sea mediante un comportamiento muy complicado. De modo que la complicación de éste no demuestra que las relaciones del parámetro con el sistema hayan de ser complicadas (ni siquiera lo apunta), pues, como hemos visto en 6/3, el número de campos es igual al número de valores que pueda tomar el parámetro, lo cual no tiene nada que ver con el número de variables principales, que es lo que, en general, determina la complejidad del comportamiento de búsqueda de la meta.

Estas consideraciones pueden aclarar las relaciones entre los cam-

bios de concentración de una hormona sexual en la sangre de un mamífero y su comportamiento sexual (en búsqueda de su meta) subsiguiente: la simple alternancia entre "presente" y "ausente", o entre dos niveles separados por un umbral, bastaría para dar razón de un grado cualquiera de complejidad de los dos comportamientos, ya que no ha de relacionarse esta característica con el parámetro hormonal, sino con el sistema nervioso sobre el que actúe este último; en efecto, puesto que el sistema nervioso de los mamíferos es enormemente complicado, y puesto que es, en casi todos sus puntos, sensible tanto a las influencias físicas como a las químicas, no parece haber razón para suponer que la directividad de las hormonas sexuales sobre el comportamiento del cerebro sea esencialmente diferente de la propia de cualquier parámetro sobre el sistema regido por él. (En cuanto a que las hormonas sexuales susciten específicamente el comportamiento sexual, es, desde luego, explicable por el hecho de que la evolución ha llegado a formar, mediante la selección natural, mecanismos específicos que reaccionen frente a la hormona de aquella manera específica.)

Configuración de los genes y ultraestabilidad

9/17. Podemos volver ahora a las cuestiones del apartado 1/9 y preguntarnos qué parte desempeña la configuración de los genes en la determinación del proceso de adaptación.

Tomando como base el diagrama de efectos inmediatos (figura 7/5/1), podemos responder sin dificultad si tomamos el sistema por partes y un canal tras otro.

Suponemos, naturalmente, que el medio está dado arbitrariamente, y que lo mismo ocurre con el canal a cuyo través afecte aquél a las variables esenciales (apartado 7/8). En cuanto a éstas y sus límites, están determinados por la configuración de genes (cf. 3/14), ya que constituyen una característica de la especie del caso.

En el organismo vivo, la parte que reacciona, *R*, tiene, de hecho, tres tipos de "entrada": existe la entrada sensorial precedente del medio, hay además los valores de los parámetros de *S*, y, por fin, se tienen los parámetros que hayan sido determinados genéticamente durante el desarrollo embrional (hemos hecho ver en *I. to C.*, apartado 13/11, que las tres clases de valores deben considerarse como "entrada"). Estos tres conjuntos de parámetros varían con escalas temporales sumamente diferentes: los parámetros genéticos (los que hacen que esto sea un cerebro de perro y aquello uno de pájaro) se mues-

tran sólo durante cierto período de la vida del animal; los de S cambian únicamente (si la adaptación se produce mediante ensayos claramente distintos) entre ensayo y ensayo, y los de la entrada sensorial varían de modo más o menos continuo. Por consiguiente, podemos rastrear la influencia de la configuración de genes en *R*, que habrá dado lugar en esta parte a ciertos conductos anatómicos, ciertos procesos bioquímicos y estructuras histológicas que habrán determinado la manera en que se ha de adaptar: si como lo hace el perro o como la estrella de mar.

La naturaleza de los parámetros de S se encuentra enteramente regulada genéticamente, ya que la forma física que hayan adoptado será probablemente debida a que en el proceso de selección natural se haya mostrado idónea. (Es preciso separar con tada claridad la ***naturaleza*** de los parámetros — el que sean circuitos reverberantes, configuraciones moleculares, etc. — de los ***valores*** que pueda tomar uno cualquiera de ellos.)

Finalmente, nos encontramos con la relación que existe entre las variables esenciales y las de S: la de que aquéllas, cuando se encuentren fuera de sus límites fisiológicos, han de obligar a éstas a cambiar, y a no hacerlo en caso contrario (cf. 7/7). Como esta relación es enteramente *ad hoc*, tiene que estar determinada por la configuración de genes, ya que no existe ningún otro posible origen para su elección.

Estas son las formas, pues, en que tiene que actuar la configuración de los genes en cuanto determinadora de los mecanismos del organismo vivo para la adaptación.

9/18. Es necesario responder a la pregunta acerca de si podemos suponer razonablemente que la ultraestabilidad, tal y como la hemos descrito, se ha formado por selección natural; pues los ragos *ad hoc* del apartado anterior carecen de todo otro factor determinante apropiado para su selección y adecuación.

Para que la ultraestabilidad se haya constituído por selección natural, es necesario y suficiente que exista una sucesión de formas, de la más sencilla a la más complicada, tal que cada una de ellas posea un valor de supervivencia superior al de la forma que le preceda. Dicho de otro modo, es menester que la ultraestabilidad no sólo adquiera valor para el organismo cuando se tenga una forma compleja dotada de partes y relaciones todas irreprochables, pues tal cosa ocurrirá sólo muy rara vez.

Supongamos que el organismo de partida no tenga mecanismos de escalón, y que, por tanto, disponga únicamente de un conjunto de reacciones permanente e invariable. En caso de que una mutación condujese

a formar un único mecanismo de este tipo, cuyos valores críticos fuesen tales que cuando el organismo se alarmase pasara a otro valor *antes* de que las variables esenciales excedieran de sus límites, y de que ello afectase de algún modo a la reacción entre el organismo y su medio, semejante mecanismo podría aumentar las probabilidades de supervivencia del ser vivo. Así pues, una sola mutación que diese origen a un solo mecanismo de escalón podría resultar ventajosa; ventaja que, aunque pequeña, podría ser suficiente para establecerla como característica de la especie correspondiente; y una segunda mutación podría continuar el proceso. Por consiguiente, el paso del sistema original al ultraestable podría realizarse mediante una larga serie de pequeños cambios, cada uno de los cuales mejorase la probabilidad de sobrevivir; y, por tanto, tal paso es posible por efecto de la selección natural.

Resumen

9/19. Hemos llegado ya, en lo esencial, a la solución del problema del capítulo I, solución que podemos resumir del modo que sigue:

En el problema tipo del apartado 1/17, las perturbaciones que llegan al organismo pertenecen a dos tipos muy distintos (esto es, su distribución es bimodal): las de uno son pequeñas, frecuentes e impulsoras, y actúan sobre las variables principales; mientras que las del otro son grandes e infrecuentes, e inducen un cambio en forma de función escalonada en los parámetros de la parte que reacciona. A este segundo tipo pertenece la importantísima perturbación de la embriogénesis, que lanza al mundo al organismo cuando tiene un cerebro lo suficientemente desorganizado como para requerir una corrección posterior (y a este respecto el aprendizaje y la adaptación están relacionados entre sí, pues la misma solución es válida para ambos).

El regulador apropiado para tal distribución de perturbaciones (es decir, para que las variables esenciales se mantengan dentro de límites fisiológicos) ha de ser uno cuyas realimentaciones totales tengan asimismo una forma bimodal: unas tienen que proporcionar estabilidad frente a frecuentes perturbaciones impulsoras de las variables principales, y debe haber, además, una realimentación más lenta, que dé lugar a cambios en forma de función escalonada, que proporcionen estabilidad contra las perturbaciones, asimismo escalonadas, más infrecuentes.

Podemos considerar simplemente el total como un regulador complejo, estable frente a un conjunto complejo (bimodal) de perturbacio-

nes; o bien, de modo equivalente, como un regulador de primer orden (frente a las pequeñas perturbaciones impulsoras) que puede reorganizarse a sí mismo de modo que consiga recuperar la estabilidad después de que la perturbación constituída por la embriogénesis o un cambio de importancia en las condiciones en que se encontrase hayan acabado con tal estabilidad. Cuando el biólogo mira el sistema de esta segunda forma dice que el organismo ha "aprendido", y se da cuenta de que el aprender tiende siempre hacia un modo mejor de comportamiento.

9/20. Tal es la solución, en bosquejo. Sin embargo, es muy posible que al lector le parezca que la información que proporciona es muy escasa.

Hasta cierto punto está perfectamente la generalidad del sistema ultraestable (el grado en que *no* especifica los detalles): la serie de sistemas que pueden presentar adaptación excede con mucho la de los mamíferos, e incluso la de los seres con cerebro, de modo que cualquier pretendida solución que afirmase, digamos, que la mielina es necesaria, sería notoriamente errónea, ya que es obvio que el homeóstato no la tiene. Así pues, la generalidad — o, si se prefiere, la vaguedad — del sistema ultraestable es, desde tal punto de vista, tal como debe ser.

Sin embargo, en cuanto se pretende aplicar esta formulación general al sistema nervioso real se tropieza con importantes dificultades; de ellas, y de cómo se las ha de abordar, nos ocuparemos en lo que resta del libro.

Las situaciones recurrentes

10/1. En el capítulo anterior hemos terminado el estudio acerca de cómo cambia el organismo de una situación no adaptada a la adaptada; pero este sencillo problema y su solución constituyen sólo un primer paso hacia la comprensión del cerebro viviente, y, en especial, del humano; es preciso que compliquemos ulteriormente el sencillo sistema ultraestable. Pues el organismo vivo no solamente llega a adaptarse, sino que lo hace a lo largo de un proceso que da pruebas de su eficiencia — en el sentido de que se llega a la adaptación siguiendo una ruta que no se aparta mucho de la que entrañaría un tiempo, una energía y un riesgo mínimos —; y, aun cuando no hemos definido con precisión "eficiencia" en este contexto, pocos negarían que las hazañas del homéostato más sugieren ineficiencia que lo contrario. Pero antes de lanzarnos a hacer "mejoras" hemos de ponernos en claro sobre lo que estamos asumiendo.

10/2. Volvamos a los primeros principios. Lo que "éxito" o "adaptación" significan para un organismo es que, por adversa que haya sido la actuación del mundo, él ha respondido de forma que ha logrado sobrevivir durante el tiempo necesario para reproducirse.

Ahora bien, podemos mirar "la actuación del mundo" como una *magna perturbación*, única, muy compleja y que dura toda la vida, frente a la cual el organismo produce una *magna respuesta* asimismo única, que dura toda la vida y muy compleja; y la relación existente entre ambas (cf. *I. to C.*, capítulo X) determinaría el *magno resultado* — éxito o fracaso —. En este caso completamente general, las relaciones mutuas entre las perturbaciones parciales (que constituyen, entre todas, aquella *magna perturbación*) y las respuestas parciales (que se integran en la *magna respuesta* del organismo) pueden tener un grado cualquiera, desde ser nulas a completas (la interrelación es "completa" cuando el *magno resultado* es función de *todas* las respuestas parciales, lo cual correspondería a una relación enormemente compleja entre éstas y el resultado definitivo).

El caso de interrelación completa, aun cuando es fundamental teoréticamente (debido a su generalidad total), apenas tiene importancia en la práctica, pues rara vez se presenta en nuestro mundo terrestre (si bien puede aparecer más a menudo en modelos o en procesos de adaptación que se desarrollen en grandes calculadoras); y de ser frecuente, el cerebro carecería de utilidad (véase *I. to C.*, 13/5). En realidad, se han llegado a formar cerebros debido a que el medio terrestre enfrenta, por lo regular, al organismo con una magna perturbación que posee un grado de sujeción o ligadura [*constraint*] entre sus partes de gran importancia, sujeción de la que el ser vivo puede sacar partido; pues éste suele toparse con un mundo que se repite, que es en cierta medida coherente en su obediencia a leyes, que no es enteramente caótico. Cuanto mayor es el grado de ligadura, más puede especializarse el organismo (en vías de adaptación) en las formas específicas de medio que se le ofrezcan, y al especializarse de este modo aumentará su eficiencia con respecto a tales formas. Si al lector le parece que la eficiencia del sistema ultraestable, tal y como lo hemos descrito hasta ahora, es extremadamente reducida, ello se debe a que, por ahora, carece de toda especialización, y a que está enfrentándolo inconscientemente con un conjunto de medios que ha restringido de algún modo no expuesto explícitamente, hasta el momento, en la presente obra.

10/3. Los capítulos que siguen prestarán atención a diversas ligaduras o sujeciones enormemente corrientes, y harán ver que las especializaciones apropiadas a ellas sirven de ejemplo, de varios modos distintos, de las proposiciones arriba impresas; estudiarán diversas maneras que tienen los medios terrestres ordinarios de no cubrir la totalidad de la gama posible, y nos harán ver cómo tales restricciones indican vías por las que el organismo vivo puede especializarse y, de este modo, sacar partido de ellas.

Las situaciones recurrentes

10/4. En el presente capítulo vamos a dedicarnos a un caso que tiene gran importancia en la vida real: aquél en que las perturbaciones ocasionales (clase 2 del apartado 9/14) se repiten a veces, y en el que una respuesta que haya sido adaptativa cuando apareciese la perturbación por vez primera lo será también cuando la misma perturbación se presente una segunda vez, una tercera o posteriormente.

No hemos de dar por supuesto que una respuesta tiene que ser adaptativa en todas las ocasiones en que aparezca una perturbación determinada, pues hay casos en que el carácter de ser apropiado o no depende del número de veces en que la perturbación haya aparecido antes. Tenemos un ejemplo notable en el caso de la rata que se tropiece con un medio (natural, según el apartado 3/1) en el que encuentre alimento, en el mismo sitio, durante dos noches sucesivas, y en donde haya la tercera noche una mezcla letal de la misma clase de comida y de un veneno (es el método de "poner un cebo"). Los medios de esta índole poseen gran complejidad intrínseca: en nuestro caso, y en los supuestos admitidos, una adaptación completa pide el siguiente esquema de reacción: cómase, cómase, no se coma; el cual es mucho más complicado que el sencillo esquema de comer siempre, o de no comer siempre, ya que las tres partes tienen que relacionarse entre sí, y la terna formada ha de organizarse totalísticamente [*holistically*].

En este capítulo estudiaremos el otro caso, que ocurre frecuentemente: aquél en que lo apropiado a una perturbación tiene como condición cuál sea ésta, pero no cuándo aparezca en la serie de todas las perturbaciones.

Hasta ahora, el sistema ultraestable (representado, digamos, por el homeóstato) ha encontrado — por ejemplo, en las figuras del capítulo VIII — cambios de valor del parámetro tales que el segundo sea meramente distinto del primero; mas ahora vamos a considerar el caso en que el parámetro tome una sucesión de valores, *v. gr.*,

$$P_2\ P_8\ P_2\ P_1\ P_6\ P_4\ P_6\ P_1\ P_2\ \ldots,$$

en la que se produzcan repeticiones a intervalos irregulares, y en la que la respuesta a P_2, por ejemplo, que fuese adaptativa cuando este valor apareciera por primera vez, lo sea también las demás veces que surja.

Cuando ello ocurre, se tiene ocasión de sacar ventaja del hecho de que cabe responder inmediatamente a P_2, en sus apariciones posteriores a la primera, sin necesidad de llevar a cabo una nueva serie exploratoria de ensayos y errores.

Este caso tiene una importancia especial, ya que, como hemos visto en 8/10, incluye aquél en que los cambios de valor de P corresponden al paso de un medio a otro. Supongamos, por ejemplo, que una rata de campo aprenda primero a daptarse a las condiciones reinantes en un establo (P_2), luego a las de un granero cercano (P_3), y así sucesivamente; una vez realizadas ambas adaptaciones, no cabe

duda de que sus posibilidades de supervivencia aumentarían si pudiese volver al establo y continuar en el acto las adaptaciones que hubiere formado allí. Un organismo dotado de semejante capacidad puede *acumular* adaptaciones.

10/5. Para percatarnos de lo necesario, veamos lo que ocurre en el homeóstato. Una ligera reflexión o un ensayo real hacen patente muy pronto que el modelo actual está enteramente desprovisto de tal capacidad de acumulación; así, en la figura 8/4/1, la inversión producida en R_2 restaura las condiciones externas a las que ya estaba adaptado en D_1, y, sin embargo, tras los sucesos que siguen a la primera inversión (la producida en R_1) se pierde completamente la primera adaptación (la de D_1); el homeóstato se enfrenta con la situación que sigue a R_2 exactamente lo mismo que lo haría si apareciese por primera vez.

En general, cuando a este aparato se le presenta un problema *A*, luego otro *B*, y, por fin, de nuevo *A*, se ocupa de este último igual que si no lo hubiese encontrado antes jamás; las actividades efectuadas durante la adaptación a *B* han destruído totalmente la previa adaptación a *A* (el psicólogo diría que la inhibición retroactiva ha sido completa: cf. **16/12**).

No es posible mejorar esta manera de adaptarse a *A* cuando se presente por segunda vez si el medio es tal que no entrañe que la segunda reacción a *A* tuviese que ser igual que la primera; podemos describir el comportamiento del homeóstato, pues, como el de un sistema que "no se precipita a sacar conclusiones", sino que "trata cada nueva situación de acuerdo con sus merecimientos"; y en un mundo en que la regla general fuese el poner cebos, saldría mejor parado que la rata. Sin embargo, cuando el medio *presenta* el tipo de sujeción que hemos supuesto en este capítulo, el homeóstato es incapaz de sacar partido de él. ¿Cómo cabría modificarlo para que le fuese posible hacer esto último?

10/6. En realidad, el homeóstato dispone de un pequeño recurso para manejárselas con situaciones recurrentes, si bien su utilidad es muy escasa; en el apartado 8/10 vimos que su campo definitivo es aquel que posee estabilidad en todas las situaciones, de modo que el paso de una de ellas a otra no exija nuevos ensayos.

10/7. Con todo, no se puede hacer un uso extenso de semejante método en las adaptaciones de la vida real, y ello por dos razones. La

primera es que cuando el número de valores no es muy pequeño, es muy probable que el tiempo requerido para encontrar un conjunto apropiado de valores de las funciones escalonadas exceda de cuanto es posible disponer ordinariamente (cuestión sobre la que volveremos en el capítulo XI). El segundo es que una adaptación, por muy establecida que esté, solamente es segura si el conjunto de valores del parámetro es cerrado, es decir, en tanto no aparezca ningún valor nuevo; en caso contrario, todo lo conseguido se deshace, y la adaptación al nuevo conjunto de valores (el conjunto antiguo incrementado con el nuevo miembro) ha de empezar otra vez desde el principio. Pero la observación corriente hace ver que cada adaptación nueva no destruye todas las anteriores; luego es evidente que el método de 8/10 tiene escasa importancia práctica.

El acumulador de adaptaciones

10/8. Con objeto de ver lo necesario, demos por supuesto que los organismos suelen ser capaces de adjuntar adaptaciones nuevas sin destruir las antiguas, y deduzcamos qué modificaciones ello impone a la formulación de 7/5. Supongamos, pues, que un organismo se haya adaptado a un valor P_1, que luego lo haya hecho a P_2 siguiendo el camino del ensayo y error (como en 7/23), y que cuando se restaura P_1 resulte estar adaptado *en el acto,* sin más ensayos. ¿Qué podemos deducir de aquí?

(Los argumentos que culminaron en el apartado 7/8 son aplicables ahora sin alteración, de modo que podemos dar por seguro que la adaptación a cada valor individual de P se realiza a través de una segunda realimentación, en la que las variables esenciales gobiernan las funciones escalonadas, como en 7/7. Y podemos hallar la modificación a introducir aplicando directamente el método de 4/12, esto es, viendo si las variaciones de una variable conducen a variaciones en otra.)

Definimos, para desplegar la argumentación en forma completa, dos subconjuntos de los mecanismos de escalón de S que afecten a R (figura 7/5/1):

S_1: aquéllos cuyo cambio, estando P en P_1, haría que se perdiese la adaptación a P_1 (es decir, los que son eficaces para R cuando P se encuentre en P_1); y

S_2: aquéllos que cambian de valor siempre que se efectúen ensayos posteriores a los que dieron lugar a la adaptación a P_2.

Lo primero que se sigue es que *los conjuntos* S_1 *y* S_2 *están disjuntos,* o sea, que no tienen ningún elemento común; pues si existiese alguno, por ser miembro de S_2 cambiaría de valor cuando se aplicase P_1 por segunda vez, y, por consiguiente, obligaría al comportamiento ante P_1 a cambiar (por ser miembro de S_1), haciéndose distinto en la segunda presentación de este valor, lo cual es contra la hipótesis. Así pues, para que se retenga la adaptación a P_1 pese a la correspondiente a P_2, los mecanismos de escalón tienen que distribuirse en *clases separadas.*

(Podemos convencernos de lo plausible de que estos mecanismos se repartan en clases separadas al pensar que, en cualquier sistema ultraestable, tales mecanismos *aportan información acerca de cómo se hayan comportado anteriormente las variables esenciales.* En el momento en que P_1 aparece por segunda vez, para que el comportamiento sea adaptativo *en el acto* es preciso que en algún sitio haya información sobre el comportamiento anterior de estas variables, ya que, por hipótesis, ellas mismas no ofrecen en tal momento ninguna sobre semejante cuestión, y, además, constituyen la única fuente informativa; luego debe estar almacenada en algún lugar del sistema dicha información. Pero es necesario que tal almacén *no* sea accesible mientras funcione P_2, ya que resultaría afectado por los acontecimientos y se tendría una superposición de los registros informativos; por tanto, es menester que haya almacenes separados para P_1 y P_2, y que esté dispuesto todo para su utilización por separado.)

Consideremos después el canal procedente de las variables esenciales. En las condiciones P_2, el canal que va de ellas a los mecanismos de escalón de S_2 estaba, sin duda, abierto, pues los sucesos de aquéllas (el que estuvieran o no comprendidas dentro de límites fisiológicos) afectaban a lo que acontecía en S_2 (de acuerdo con los procesos ordinarios de adaptación); por otra parte, durante este tiempo el canal de las variables esenciales a los mecanismos de escalón de S_1 se encontraba, evidentemente, cerrado, ya que a los cambios sobrevenidos a tales variables *no* seguían otros de estos mecanismos. Por tanto, el canal que lleva de las citadas variables a los mecanismos de escalón de S tiene que ser divisible en fracciones tales que una pueda transmitir mientras las demás no puedan; y la determinación de cuál haya de ser la que transmita ha de hallarse regida, al menos en parte, por las condiciones P, de modo que varíe en forma acorde con la variación de P entre P_1 y P_2.

Veamos, finalmente, los canales desde S_1 y S_2 a la parte que reacciona, R. Cuando se aplica P_1 por segunda vez, el que va de S_2 a R está, sin duda, cerrado, ya que, no obstante haber cambiado los pa-

rámetros de S_2 (esto es, antes y después de P_2), no se produce ningún cambio en el comportamiento de R (por hipótesis). Por otra parte, el que procede de S_1 está abierto, evidentemente, pues son los valores de S_1 los que determinan el comportamiento bajo P_1, y llega a aparecer la forma adaptada a ellos.

10/9. En resumen. Damos por supuesto que el organismo se haya adaptado a P_1 por el procedimiento de ensayo y error, que luego lo

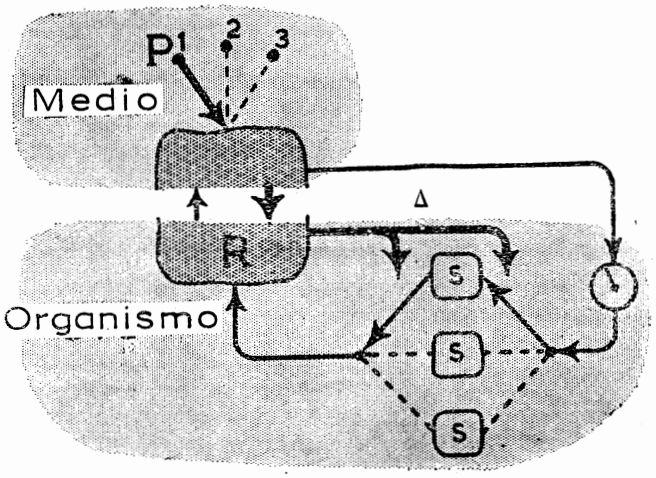


FIGURA 10/9/1.

haya hecho a P_2 de modo análogo y que cuando apareciera por segunda vez P_1 se adaptase inmediatamente, sin ensayos ulteriores. De ello podemos deducir que los mecanismos de escalón *tienen que* ser divisibles en conjuntos no imbricados, que las reacciones a P_1 y a P_2 han de deberse cada una a su conjunto concreto y que la presentación del problema (es decir, el valor de P) debe determinar qué conjunto ha de entrar en conexión funcional, mientras que los restantes permanezcan en aislamiento funcional.

Así pues, si se toma como base el diagrama de la figura 7/5/1, es preciso modificarlo de modo que los mecanismos de escalón queden escindidos en conjuntos, que haya algún mecanismo discriminador de entrada, Δ, para determinar qué conjunto ha de quedar incluído en el circuito de realimentación, y que este discriminador, Δ, esté mandado por el valor de P (normalmente a través de R, ya que tal es la estructura del organismo).

La figura 10/9/1 representa el diagrama de efectos inmediatos

(más ha de considerársela como un recurso mnemotécnico para retener las relaciones funcionales, y no dejarse arrastrar por lo que pueda sugerir de formas anatómicas); el parámetro P puede fijarse en diversos valores, $P_1 P_2, \ldots$; los mecanismos de escalón están divididos en conjuntos, y existe un mecanismo discriminador, Δ, mandado por P a través del medio y de la parte que reacciona, R, que determina cuál de los conjuntos habrá de actuar en la segunda realimentación, que pasa a través de las variables esenciales.

10/10. Acaso parezcan algo complicados el diagrama de la figura anterior y el comportamiento del mecanismo discriminador de entrada, pero hemos de cuidarnos mucho de ver en ellos mayor complicación de la necesaria; todo lo que *se necesita* es que los mecanismos de escalón involucrados en cualquier problema concreto, P_i, sean distintos de los correspondientes a los demás, que en caso de que S_i esté afectado por las variables esenciales constituya, asimismo, el mecanismo afectador de R, y que exista una correspondencia entre los problemas y el conjunto de mecanismos de escalón. No es necesario que esta última correspondencia sea ordenada ni "racional"; muy bien puede estar establecida aleatoriamente (esto es, determinada por factores que escapen a nuestro punto de vista), con tal de que si la aparición de un problema concreto, P_i, se resolvió una vez mediante el conjunto S_i, siempre que se presente de nuevo P_i la actuación del organismo se canalice a través de S_i. Esto es lo que ocurriría si las conexiones fuesen, por ejemplo, eléctricas y si se realizasen enchufando clavijas al azar en un cuadro de conexiones; una vez establecidas éstas, garantizarían que la recurrencia de P_i daría lugar a idéntica configuración selectora de S_i; y el paso de P_i a otro problema (P_j, digamos), por entrañar ciertos cambios en la entrada sensorial de R, daría lugar a ciertos cambios de la distribución entre los mecanismos de escalón.

Del mismo modo, si las células nerviosas creciesen aleatoriamente (es decir, con crecimiento determinado por minucias locales y momentáneas de aporte de oxígeno, de esfuerzos mecánicos, etc.), hasta la fijación de todos sus detalles histológicos, y si los cambios seguidos por los impulsos dependieran de la concatenación de estímulos incidentes, la recurrencia de P_i daría siempre acceso a S_i, y el paso de P_i a P_j, debido a un cambio en los estímulos sensoriales, haría que cambiase la distribución.

En el apartado 16/13 presentaremos un método muy sencillo de lograr un efecto como el que pedimos a Δ.

Pero no es menester que nos detengamos en estos pormenores. Sólo los mencionamos para hacer ver que los principales requisitos pueden satisfacerse fácilmente, y que el mecanismo que lo consiga puede tener un aspecto harto menos neto que lo que la figura 10/9/1 podría sugerir; y, en este sentido, esta figura, aun cuando útil por diversos conceptos, puede resultar gravemente desorientadora. (Volveremos sobre estas cuestiones en 16/12).

10/11. En los apartados anteriores, las distintas situaciones, P_1, P_2, P_3, ..., eran arbitrarias, y no asumíamos la existencia de ninguna relación particular entre ellas. Existe, sin embargo, un caso especial, cuya frecuencia hace que tenga bastante interés cuando aquellas situaciones se presentan en una sucesión determinada; así, un niño que quiera coger una pasta de la mesa tendrá primeramente que conseguir que la mano no le tropiece en el borde de ésta, luego que pase junto a la taza sin verterla, después que rebase la mermelada sin ensuciarse el puño, etc.; una sucesión de acciones cada una de la cuales pide cierta adaptación. Y gran parte de la vida consiste precisamente en sucesiones o secuencias de esta índole.

El sistema de la figura 10/9/1 puede dar origen fácilmente a semejantes secuencias, en las que cada parte está adaptada a su propio y pequeño problema. Llamemos P_1, por ejemplo, a la situación "la mano pasando cerca del borde de la mesa y sin tropezar en él"; es posible adaptarse a ella del modo ordinario, por el método básico del sistema ultraestable. El que el puño del traje rebase el confitero con mermelada es otra situación, P_2, a la cual cabe adaptarse; y las alteraciones necesarias para esta segunda adaptación no causarán, en nuestro sistema, ningún menoscabo de la adaptación a P_1.

La posibilidad o imposibilidad de adaptarse a la situación total mediante tal sucesión de subadaptación (a P_1, a P_2, etc.), depende *del medio;* sólo ciertos tipos de éste permiten semejante fragmentación; y si son frecuentes en la vida del organismo, se conseguirá una ventaja evolutiva en caso de que la especie se modifique de tal modo que cada ejemplar se encuentre provisto genéticamente de un mecanismo análogo al de la figura 10/9/1.

10/12. Con objeto de desrrollar más este punto, podemos considerar el caso de un organismo que viva en un medio compuesto de muchas situaciones sensorialmente distintas, y tal que cada una de ellas se pueda resolver mediante una de dos reacciones fijas (comer o huir, por ejemplo); entonces, el problema que la vida presentará a dicho

organismo será el de asignar una u otra de estas dos reacciones a cada una de las múltiples situaciones con que se vaya tropezando. En semejante medio, la parte que reacciona, *R*, de las figuras 7/5/1 ó 10/9/1 podría ser sumamente pequeña, pues sólo precisa un mecanismo capaz de efectuar dos reflejos. Los "almacenes" de mecanismos de escalón, en cambio, tendrían que ser grandes, y el mecanismo de discriminación de entrada, Δ, posiblemente bastante perfeccionado, pues sería menester que hubiera tantos esquemas registrados [*records*] como situaciones sensoriales [distintas]; cada uno de tales esquemas necesitaría un lugar especial de almacenamiento, y el mecanismo de discriminación habría de garantizar que cada situación llevaba a su propio lugar. En semejante mundo sería de esperar, por consiguiente, que el organismo poseyese un cerebro de proporciones muy distintas a las de uno que viviera en un mundo análogo al que circunda al homeóstato.

La posibilidad de identificar una especie que viva en un medio de esta clase no habría de sobrepasar la capacidad del biólogo; y un estudio del sistema nervioso del organismo podría permitir, pues, que se llegase a ciertas identificaciones fundamentales.

10/13. Puede suscitarse la objeción de que las especificaciones deducidas en este capítulo son demasiado vagas para ser de utilidad a quien trabaje por encontrar el mecanismo correspondiente en el cerebro humano, pongo por caso. La respuesta que hay que dar es que hacen muy bien en ser vagas; pues lo que en ellas se ofrece —el que la adaptación se presente con la acumulación— se especifica en una clase enormemente amplia de mecanismos, de modo que una diversidad muy grande de máquinas reales podría ostentar una adaptación con acumulación; y, por ello, una deducción que, sin más *datos*, procediese a señalar alguna de estas clases sería manifiestamente errónea.

Lo que nuestra deducción ha hecho ver es que tenemos que abandonar la ingenua convicción de que las notables propiedades de la adaptación indican cierto mecanismo cerebral único, o de que tales propiedades constituyen la única explicación de los rasgos del cerebro vivo. No es posible referir unívocamente muchos de estos rasgos a los procesos de adaptación, ya que tales procesos pueden encontrarse en sistemas carentes de semejantes rasgos neurofisiológicos, sistemas tan distintos del cerebro vivo como la computadora moderna; y solamente una información ulterior a la supuesta en este capítulo puede hacer que avance la identificación.

El sistema completamente enlazado

11/1. El homeóstato es, desde luego, enormemente distinto del cerebro en muchos respectos, entre ellos el sumamente obvio de que, mientras que éste se compone de gran número de partes, nuestro aparato tiene, de hecho, solamente cuatro. Esta diferencia no hace del todo inaplicable la teoría del sistema ultraestable, pues ésta se puede emplear con una independencia muy grande del número de partes (que, simplemente, no es pertinente). Con todo, después de haber dedicado tanto tiempo a penetrar este sistema de cuatro partes, corremos el riesgo de formar un conjunto de imágenes y de conceptos de trabajo gravemente desproporcionado si se lo considera como conjunto de éstos con el que reflexionar acerca del cerebro real. Consideremos específicamente, pues, las propiedades del sistema ultraestable, dotado de gran número de partes: veremos que hay una dificultad de primera magnitud, acerca de la cual vamos a tratar durante el resto del libro, pues se trata del principal problema de la adaptación de los sistemas de gran tamaño.

El tiempo de adaptación

11/2. Supongamos que el homeóstato tuviese mil unidades (tamaño que sólo constituye una pequeñísima fracción del de un cerebro, pero que vale para nuestros propósitos); habría en él mil relevadores (como el *F* de la figura 8/2/3), pero vamos a admitir que se cortocircuitan todos salvo cien, de modo que el sistema contenga cien variables esenciales (número del mismo orden de magnitud que los que se encuentran en los organismos vivos).

Como todas ellas son esenciales, la adaptación implica que *todas* han de mantenerse dentro de límites adecuados. Intentemos un cálculo preliminar y tosco, para lo cual asumiremos que en los cambios que experimenten los mecanismos de escalón se otorga a cada variable esencial igual probabilidad de permanecer dentro de sus límites que

de excederlos, y que tales probabilidades son independientes (teniendo en cuenta la estrategia del apartado 2/17, es preciso considerar de importancia central el caso de la independencia). Preguntamos ahora *cuántos ensayos,* por término medio, necesitará la adaptación.

Cada una de las variables tiene la probabilidad 1/2 de mantenerse en el interior de sus límites; en cada ensayo, la probabilidad de que las 100 variables se conserven dentro de ellos vale $(1/2)^{100}$, de modo que el número medio de ensayos será 2^{100} (véase el apartado 22/7). ¿Cuánto tiempo se requerirá para ejecutarlos al ritmo de uno por segundo, por ejemplo? La respuesta es: alrededor de 10^{22} años, ¡tiempo inimaginablemente mayor que cualquier período astronómico! Para todos los fines prácticos, ello equivale a nunca, de modo que nos topamos con nuestro problema principal; el cerebro, aun teniendo muchísimos componentes, *se adapta* en un tiempo bastante pequeño, mientras que el homeóstato de 1.000 unidades, si bien dotado de un número inmensamente menor de componentes, no lo consigue. ¿Qué es lo que está mal?

Difícilmente puede ser ello que el cerebro no utilice los procesos básicos de la ultraestabilidad, pues los argumentos del apartado 7/8 hacen ver que *todo* sistema constituído por partes que obedezcan a las leyes ordinarias de causa y efecto tiene que emplear este método. Además, no hay razón para suponer que la función 2^N (siendo N el número de variables esenciales) sea gravemente errónea, aun cuando está sujeta a algunas incertidumbres, pues otras líneas argumentativas (que expondremos más abajo) conducen a igual orden de magnitud, que es excesivamente grande para ser compatible con los hechos que conocemos. Así pues, ¿en qué se diferencia (esencialmente) este sistema del formado por el cerebro y su medio?

11/3. En el apartado anterior hemos pasado por alto, realmente, la naturaleza dinámica del cerebro y el medio, puesto que el cálculo se basaba en una relación directa entre los mecanismos de escalón y las variables esenciales, en tanto que dejábamos de lado lo que los conectase. Formularemos la pregunta de nuevo, desdeñando ahora las variables esenciales, mas parando mientes en los sistemas dinámicos constituídos por el medio y la parte que reacciona (figura 7/2/1). De acuerdo con 2/17, conviene estudiar dos casos tipo.

El primero aparece cuando el sistema es lineal, como el homeóstato, de manera que tenga un solo estado de equilibrio (estable o inestable). Entonces, los campos inestables no tienen utilidad alguna para el organismo, ya que no son duraderos, mientras que el campo estable

puede ser permanentemente útil, por ser el único persistente. Preguntemos, pues: si un homeóstato tiene mil unidades, ¿cuántos ensayos serán necesarios para encontrar un campo *estable*? Aun cuando no conocemos la respuesta correspondiente, ya que el problema matemático que implica no se ha resuelto todavía, tenemos datos (cf. 20/10) que sugieren que, en ciertos casos típicos, esta cantidad será del orden de 2^N, siendo N el número de variables; apenas, pues, caben dudas de que si un homeóstato estuviera compuesto de mil unidades, todo campo sería inestable, y de que la probabilidad que cada uno tendría de aparecer en toda una vida sería prácticamente nula; luego llegamos a una conclusión muy parecida a la de antes.

El segundo caso que hemos de considerar es el de un sistema tal que la tranformación de sus estados se produzca aleatoriamente, de suerte que todo estado pase a cualquier otro equiprobablemente. Estos sistemas han sido estudiados por Rubin y Sitgreaves, quienes hallan que la trayectoria modal tiene una longitud de $\sqrt{n}$, siendo n el número de estados; ahora bien, si el conjunto total está formado por N partes, cada una de las cuales pueda tomar σ estados, aquél puede adoptar uno cualquiera de los σ^N estados posibles, que es la cantidad igual a n; luego la longitud modal de la trayectoria es $\sqrt{\sigma^N}$, que se puede escribir también $\left(\sqrt{\sigma}\right)^N$. Y, una vez más, si substituímos unos valores plausibles, siendo $N = 1.000$, vemos que la longitud de trayectoria —y, por tanto, el tiempo requerido para que el sistema se detenga en equilibrio, *cualquiera* que éste sea— excede enormemente a lo que, según observamos en la vida corriente, necesitan los cerebros vivos.

11/4. Las tres funciones que nos proporcionan estos tres procedimientos de cálculo pertenecen al tipo exponencial, ya que el número de ensayos es siempre proporcional a cierto número elevado a una *potencia* igual al número de variables esenciales o de partes componentes. Las funciones exponenciales poseen una peculiaridad fundamental: aumentan con lentitud muy engañosa cuando el exponente es pequeño, y luego desarrollan una velocidad de ascenso fantástica, al crecer éste. Por tanto, mientras el homeóstato tenga pocas unidades el número de ensayos que necesitará no será grande; sin embargo, en cuanto le permitamos pasar al moderado tamaño de mil unidades, llegará a cifras que hagan parecer insignificantes incluso las astronómicas. Dada esta forma exponencial, ni la mera aceleración de los

ensayos individuales ni ningún otro proceso parecido harán descender tal número a una magnitud corriente.

11/5. Lo que ha ocasionado que los procesos mencionados en los dos últimos apartados consuman un tiempo tan excesivo es el que los éxitos parciales no valgan para nada. Con objeto de advertir el peso de este hecho, estudiemos un cálculo sencillo que nos sirva de ilustración en este punto.

Consideremos N acontecimientos, cada uno de los cuales tenga una probabilidad p de éxito, y que estas probabilidades sean independientes entre sí; como ejemplo, supongamos que N ruletas estuvieran marcadas en la periferia con las letras A y B, de modo que las A ocupasen la fracción p de cada circunferencia y las B el resto. Se hacen girar todas y se deja que se detengan, contando como un acierto cada una de las que se paren en A. Vamos a comparar tres maneras de reunir estos aciertos mínimos en un Magno Acierto * (que supondremos ocurre cuando todas estén detenidas en A).

Caso 1. — Se lanzan las N ruletas; si todas caen en A, se tiene un acierto y acaban los ensayos; si no es así, se vuelve a tirar; y así sucesivamente hasta que aparezca "A en todas".

Caso 2. — Se hace girar la primera ruleta; si se detiene en A se deja donde esté; si no, se lanza otra vez. Cuando se pare, por fin, en una A, se hace girar la segunda; y así sucesivamente toda la serie de las N ruletas, una tras otra, hasta que todas marquen A.

Caso 3. — Se lanzan las N ruletas; las que se paren en A se dejan sin tocar, y las que lo hagan en B se hacen girar de nuevo; cada vez que salga una A no se toca más la ruleta correspondiente, de modo que progresivamente se van lanzando menos, hasta que todas hayan caído en A.

Consideremos que cada lanzamiento (cualquiera que sea el número de ruletas que se hagan girar) constituye un ensayo, y preguntemos cuántos de éstos por término medio, requiere cada uno de los tres casos.

El caso 1 necesita $(1/p)^N$, como en el apartado 11/2. El 2 precisará, por término medio, $1/p$ para la primera ruleta, luego $1/p$ para la segunda, etc.; de forma que, en total, serán N/p. El caso 3 es de cálculo difícil, pero corresponde a la media de las más largas entre las

* Puesto que hemos de considerar diversos modos de reunirse aciertos parciales en plenos o magnos aciertos, vamos a seguir el convenio de *I. to C.*, apartado 13/8, y distinguirlos escribiendo los segundos, y sólo ellos, con letra inicial mayúscula.

muestras de N [letras A] extraídas de la distribución existente en el recorrido de una ruleta; y su valor es algo mayor que $1/p$.

Estos cálculos tienen interés no por las cantidades exactas que ofrecen, sino porque cuando N aumenta tienden a valores sumamente dispares. Supongamos, por ejemplo, que p valga 1/2, que se haga un lanzamiento cada segundo y que N sea igual a 1000; entonces, si T_1, T_2 y T_3 son respectivamente los tiempos medios que se necesitan para el Acierto en los casos 1, 2 y 3:

$$T_1 = 2^{1000} \text{ segundos;}$$
$$T_2 = 2000 \text{ segundos, y}$$
$$T_3 = \text{bastante más de } 1/2 \text{ segundo.}$$

Cuando estas cifras se pasan a las unidades usuales se encuentra que T_1 vale 10^{293} años, T_2 unos 33 minutos y T_3 algunos segundos. Así pues, si bien conseguir un Acierto es prácticamente imposible con las reglas del caso 1 (todos los aciertos simultáneos), es fácil de lograr en los 2 y 3.

La conclusión final (esto es, que el caso 1 difiere mucho de los otros dos) no depende muy estrechamente de los valores concretos que tengan p y N, y sirve como ilustración del hecho general de que la función exponencial (caso 1) tiende a crecer con ritmo mucho más rápido que el lineal. Si el lector quiere probar con otros números, seguramente llegará a resultados que presenten rasgos muy parecidos a éstos.

11/6. La comparación de estos tres casos permite ver muy pronto por qué en los casos 2 y 3 podemos conseguir el Acierto mucho antes que en el 1: aquéllos pueden aprovechar los aciertos parciales, en tanto que éste no puede hacerlo. Supongamos, por ejemplo, que en el caso 1 un lanzamiento haya dado 999 *A*es y 1 *B*; ello constituye algo sumamente cercano al Acierto completo, y, sin embargo, no se cuenta, en absoluto; todas las *A*es van de nuevo al montón. En el caso 3, por el contrario, sólo habría que lanzar otra vez una ruleta, mientras que en el 2 podría obtenerse acaso una buena sucesión de *A*es con que comenzar y sacar, pues, cierto partido.

Estos ejemplos hacen ver la enorme, gigantesca reducción del tiempo consumido en los ensayos que se observa cuando cabe alcanzar el Acierto final por etapas, en las que los aciertos parciales puedan conservarse y *acumularse*.

11/7. Es difícil encontrar un ejemplo real que nos haga ver, en un solo sistema, las tres maneras de acercarse al Acierto, ya que hay muy pocos que estén constituídos de forma tan flexible. Pese a lo cual, cabe construir, basándose en la teoría de la probabilidad, ejemplos que hagan patentes las diferencias a que nos referimos. Supongamos, pues, que tomemos nota de la cifra final de la matrícula de cada coche que pase embebido en el tráfico, y que adoptemos la decisión de esperar hasta que veamos pasar automóviles cuyas cifras finales sean tales que compongan la sucesión 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9 (en este orden). Si nos empeñamos en que los diez coches correspondientes han de cruzar por delante de nosotros sucesivamente (como en el caso 1), por término medio habremos de esperar que pasen alrededor de 10.000.000.000 de vehículos, de modo que se trata de un acontecimiento imposible para todos los fines prácticos. Pero si admitimos que se pueda acertar inicialmente viendo un "0", que luego se acierte ante un "1", y así sucesivamente hasta que veamos un "9" (igual que en el caso 2), tendrán que pasar unos cien automóviles, número que convierte el "acierto" en algo fácilmente accesible.

11/8. Tenemos un ejemplo físico muy conocido que nos patentiza estas diferencias en la cristalización de un sólido a partir de su solución. En ésta, las moléculas del soluto se mueven al azar, de modo que en un intervalo temporal cualquiera dado existe una probabilidad definida de que una molécula dada tenga la posición y el movimiento apropiados para adherirse al cristal. Ahora bien, el cristal más pequeño visible tiene billones de moléculas: si, por tanto, pudiese formarse únicamente cuando aconteciera que todas sus moléculas se encontrasen simultáneamente en la posición y velocidad debidas, una con respecto de otra (caso 1), jamás se produciría una cristalización —sería demasiado improbable. Pero, de hecho, este proceso ocurre de modo sucesivo (caso 2), ya que, una vez que un cristal ha comenzado a formarse, una molécula que llegue a tener la posición y el movimiento apropiados entrará a formar parte de él, independientemente de los valores que posean estos dos parámetros en las demás moléculas de la solución. Por consiguiente, la cristalización avanza paso a paso, y el tiempo que se invierte en ella se acerca más a T_2 que a T_1.

Podemos sacar, pues, la siguiente conclusión: *Un acontecimiento complejo, que sea imposible si sus componentes hubieran de acaecer en forma simultánea, puede conseguirse fácilmente si cabe que se produzcan en sucesión o de modo independiente.*

11/9. Está empezando a ponerse en claro en qué sentido se diferencia el homeóstato de 1000 unidades, que requiere un tiempo excesivamente largo para adaptarse, del organismo vivo, que, por lo regular, se logra adaptar en una fracción del tiempo de vida de una generación: el organismo, desde luego, no llega a una adaptación adulta plena haciendo ensayo tras ensayo, cada uno de los cuales no valdría para nada hasta que, de pronto, todo estuviera bien; por el contrario, está más de acuerdo con las reglas de los casos 2 y 3, que consiguen aciertos parciales y luego *los conservan* mientras mejoran lo que aún no sea satisfactorio.

Sin embargo, antes de pararnos a considerar estos últimos casos deberíamos advertir que el homeóstato de 1000 unidades no es enteramente atípico, ya que *existen* medios — si bien son raros — que exigen que todos los aciertos ocurran simultáneamente, y frente a los cuales los aciertos parciales carecen de valor (es notorio que el organismo vivo que se encuentra con ellos tropieza con grandes dificultades). Tenemos un ejemplo insignificante en la trucha que quiere atrapar un insecto flotando en la superficie: es necesario que aflore en el lugar apropiado y que, además, cierre las mandíbulas en el momento exacto, dos variables que son esenciales en el sentido de que los valores de ambas tienen que mantenerse dentro de los límites debidos para acertar y tener éxito, de modo que un fracaso en cualquiera de los dos respectos significa fracaso completo.

El ejemplo por excelencia se halla cuando el caco, en su intento homeostático de ganarse el pan de cada día robando, se encuentra con el peculiar medio conocido con el nombre de cerradura de combinaciones: ésta se elige, naturalmente, con objeto de que le presente las mayores dificultades posibles; y su dificultad particular consiste en que el acierto parcial — el que se consiga colocar bien seis letras de siete, digamos — no tiene ningún valor, de suerte que no se avanza hacia la solución. Así pues, cuando se enfrentan con un medio que no permite sacar partido de la adaptación parcial, el ser humano y el homeóstato fracasan de igual forma.

La adaptación acumulativa

11/10. En los medios terrestres, sin embargo, semejantes problemas no son corrientes: ordinariamente el organismo posee muchas variables esenciales, y se las arregla para llegar a adaptarse en todos bastante rápidamente. Tomemos como datos estos hechos aparentemente

contradictorios y veamos qué puede deducirse de ellos (siguiendo esencialmente el método del apartado 4/12).

Bastará un ejemplo sumamente sencillo para hacer ver este punto clave. Vamos a suponer que el organismo haya llegado a adaptarse a las variables esenciales 1 y 2; o, dicho con mayor precisión: que la perturbación que proceda del medio encuentre un conjunto tal de va-

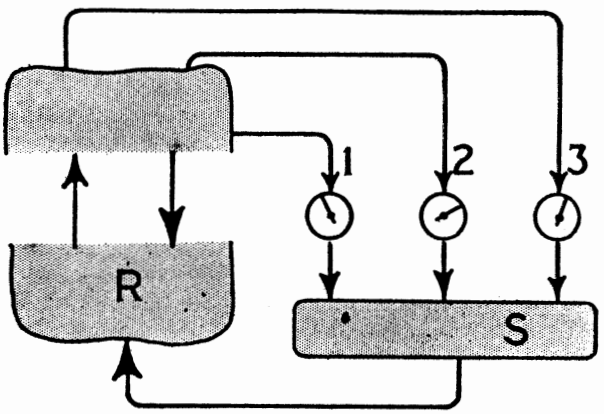


FIGURA 11/10/1.

lores de los mecanismos de escalón, S, que, al reaccionar a aquélla, las variables esenciales y 1 y 2 no salgan en ningún momento de sus límites oportunos, pero que haga salir de éstos a la 3.

Admitamos como dado que el sistema sigue un proceso análogo al de 7/23, y que, una vez que éste se haya llevado a cabo, los mecanismos de escalón pasan a unos nuevos valores tales que ahora la variable esencial 3 se mantenga dentro de sus límites, y que los otros dos *sigan reaccionando de la misma forma que antes* (ello es necesario para que podamos suponer, como queremos, que se conservan las adaptaciones anteriormente formadas).

Para ver lo que esto implica, permitamos que S_3 sea el conjunto de los mecanismos de escalón que terminaban en un valor distinto tras los ensayos debidos al proceso de adaptación a 3 (pues han de existir algunos, so pena de que la modificación de las respuestas a 3 sea un efecto sin causa). Apliquemos ahora el criterio operativo del apartado 4/12: puesto que los mecanismos de escalón de S_3 cambian de valor, mientras que los comportamientos correspondientes a 1 y 2 no lo hacen, se sigue que, a pesar de todo cuanto se vea en la figu-

ra 11/10/1, no puede haber canal efectivo de comunicación, a través de R y del medio, de los mecanismos S_3 (de S) a 1 y 2.

Hagamos ahora que M_{12} represente aquellas partes, de R y del medio, que desempeñen un papel en la determinación del modo en que la perturbación llegue a afectar a 1 y 2. Representemos, de modo parecido, con M_3 las partes del canal que lleven de S_3 a 3 pasando por R y el medio (no hacemos ningún supuesto acerca del modo en que estén relacionados M_{12} y M_3). Ahora bien, M_3 no puede estar vacío (S_3 no tendría canal por donde afectar a 3, y no se hubiese logrado la adaptación a esta variable esencial), y M_{12} tampoco puede estarlo, por igual razón. Finalmente, la deducción anterior, según la cual no hay canal procedente de S_3 (a través de R y del medio) a 1 ni a 2, implica que M_{12} y M_3 *no tienen variables comunes, ni existe ningún canal que las una* (pues en caso contrario los cambios de S_3 se reflejarían en 1 y 2, contra la hipótesis).

Hemos visto que para que las adaptaciones se acumulen es preciso que *no* haya canales desde ciertos mecanismos de escalón (*v. gr.* S_3) a algunas variables (por ejemplo, M_{12}), ni de determinadas variables (tales como M_3) a otras (así, M_{12}). Por tanto, para que la acumulación de adaptaciones sea posible, el sistema *tiene que no estar completamente enlazado.* Así pues, la idea de que todo funcionará bien con tal de que se disponga de suficientes conexiones — idea tan frecuentemente implícita en la bibliografía fisiológica — es, desde esta perspectiva, completamente errónea.

Este es el punto esencial. Para que el método de la ultraestabilidad tenga éxito en un plazo razonablemente breve, es menester que se retengan los aciertos parciales; y para que esto sea posible es necesario que ciertas partes *no* comuniquen con otras determinadas, ni ejerzan efecto sobre ellas.

11/11. Ahora podemos ver en qué era engañoso el homeóstato. Desde el comienzo del libro (apartado 1/7) hemos considerado el cerebro y su medio como si tuvieran gran riqueza de enlaces, tanto entre sus partes internas como uno con otro; el homeóstato se ha construído, por consiguiente, de modo que cada unidad se encuentre en interacción con todas las demás, y así hemos desarrollado la teoría del sistema totalmente integrado.

Al apoyarnos en sistemas que asumíamos siempre estar todo lo conectados que al lector le pareciera bien, hemos evitado la posibilidad de hablar mucho acerca de integración y luego tratar de un mecanismo que, en realidad, funcionase por partes separadas: las partes

que reaccionaban y los medios de que nos hemos ocupado hasta ahora estaban integrados en forma extrema.

11/12. Sin embargo, ahora está claro que se puede uno exceder en tal dirección: el homeóstato va demasiado lejos, está demasiado bien integrado, no puede acumular adaptaciones, y por ello tarda un tiempo nada semejante al del cerebro en llegar a la adaptación. Hemos de tratar ahora un sistema parecido al de este aparato en cuanto a estabilidad, pero con menos enlaces de unas partes con otras. Así pues, ¿en qué medida debe estar enlazado para parecerse al sistema nervioso?

Por lo general, las opiniones acerca del grado de conexión interna del sistema nervioso — su grado de "totalidad" — han tendido a colocarse en posiciones extremas. Los "reflexólogos", desde Bell en adelante, se han percatado de que cabe tratar este sistema, en algunas de sus actividades, como un conjunto de partes independientes: así, han señalado el hecho de que, por ejemplo, el reflejo pupilar a la luz y el patelar aparecen con su forma usual con independencia de que en cada caso el otro se suscite o no, que el reflejo de la tos presenta idéntica configuración lo mismo si el sujeto está de pie que si se encuentra sentado, y que la adquisición de una respuesta condicionada puede muy bien no afectar a nada importante de otra respuesta previamente establecida. Por otra parte, la escuela de la forma [*Gestalt*] ha advertido que muchas actividades del sistema nervioso se caracterizan por su índole total, de modo que lo que suceda en un punto condiciona lo que haya de suceder en otros. A veces se consideran irreconciliables estos dos conjuntos de hechos.

Con todo, ya en 1906 Sherrington hizo ver, merced a los reflejos espinales, que el sistema nervioso ni está dividido en partes permanentemente separadas ni tan enteramente enlazado que todo acontecimiento influya siempre en todos los demás: en lugar de ello, pone de manifiesto una imagen más viva y más intrincada, según la cual fluctúa entre interacciones e independencias. "Así, podemos suscitar en el rabo del perro espinal * un reflejo débil sin interferir con el reflejo de la marcha..." "Dos reflejos pueden ser mutuamente neutrales cuando ambos sean débiles, e interferir cuando uno de ellos o los dos sean vigorosos..." "Pero mostrar que unos reflejos pueden ser mutuamente neutrales en el perro espinal no demuestra de modo concluyente que

---

* Es decir, la parte de este animal que queda inervada por la médula espinal después de haber aislado funcionalmente de ésta el tronco encefálico (véase el apartado 12/11, *a*). (*N. del T.*)

lo sean en el animal con el sistema nervioso intacto, sin mutilaciones." La separación en partes múltiples y la reunión en un todo único son simplemente los dos extremos de la escala del "grado de conexión".

Como lo que principalmente me ocupaba era el origen de la adaptación y de la coordinación, he tendido hasta ahora a subrayar la conexión del sistema nervioso; pero no debe pasarse por alto que la adaptación puede exigir lo mismo independencia que interacción. Una persona que esté aprendiendo a conducir, por ejemplo, y que por el momento sólo pueda mantener el automóvil por el centro de la carretera, puede observar que todo intento de cambiar de marcha parece suscitar en el coche el intento de salirse de aquélla; pero más tarde, con más pericia, la acción de cambiar las velocidades no tendrá efecto alguno sobre la dirección de marcha. Así pues, la adaptación no solamente pide que se integren las actividades que guarden relación, sino también la independencia de las que no la tengan.

11/13. Por tanto, a partir de este momento no vamos a continuar asumiendo implícitamente que todas las partes estén abundantemente enlazadas: esta liberación hace posibles varias modificaciones, que no hemos considerado explícitamente hasta ahora y que dan lugar a nuevas formas del sistema ultraestable. Se trata de formas asimismo ultraestables, ya que se conforman a la definición correspondiente (que no involucra de modo explícito la cantidad de conexiones), pero no tan lentas en su adaptación como la simple forma del apartado 11/2: para lograrlo adquieren independencias parciales, fluctuantes y temporales dentro del todo, de suerte que éste se convierta en un conjunto de subsistemas dentro de cada uno de los cuales haya abundantes comunicaciones, pero que estén enlazados entre sí de modo más limitado. El estudio de estos sistemas nos ocupará durante el resto del libro.

La independencia temporal

12/1. Hemos utilizado varias veces, sin definirlo, el concepto de variable o sistema "independientes" de otros; pero también hemos afirmado que los sistemas, para estar determinados por estados, han de encontrarse "convenientemente aislados", y en 6/2 hemos indicado que ciertos parámetros eran "inefectivos". Hasta el momento ha sido idóneo el sencillo método del apartado 4/12, pero como ahora pretendemos ocuparnos de sistemas ni enteramente enlazados ni enteramente separados, es preciso otro método más riguroso.

A primera vista puede parecer muy sencillo el concepto de "independencia" de dos sistemas dinámicos; pues, ¿no basta la falta de conexiones materiales? Los ejemplos hacen ver que este criterio no es de fiar: dos piezas o elementos eléctricos pueden estar unidos mecánicamente de modo muy firme, pero si lo que los enlaza es un aislador, es posible que tengan completa independencia funcional; y dos mecanismos reflejos de la médula espinal pueden hallarse entretejidos inextricablemente y ser, con todo, funcionalmente independientes.

Por otra parte, cabe que un sistema no tenga ninguna conexión material con otro y, pese a ello, se encuentre marcadamente afectado por él: el receptor de radio, por ejemplo, en relación con la emisora. Incluso la separación mayor que podemos concebir — la distancia entre nuestro planeta y las nebulosas más lejanas — no constituye garantía alguna de separación funcional: pues la luz que las nebulosas emiten es capaz, de todos modos, de incitar a los astrónomos de este globo a la controversia. Así pues, el criterio de la conexión y la separación físicas carece de utilidad.

12/2. ¿Podemos hacer depender el criterio de independencia de si una variable (o un sistema) entrega energía o materia a otro? Es una sugerencia plausible, pero la experiencia que tenemos de muchos mecanismos sencillos es engañosa: cuando pulso con un dedo una tecla de la máquina de escribir, el movimiento de aquél determina

el de ésta y, además, proporciona la energía necesaria para que la tecla se mueva; en este caso, el diagrama

aseveraría que de *A* a *B* se transmite una energía (mensurable en ergios) y, asimismo, que el comportamiento de *B* está determinado por el de *A* (o es predecible a partir de éste); sin embargo, en caso de que *B* disponga de energía sin limitación, la transmisión energética de *A* a *B* pierde toda importancia para el mando. En realidad, no ofrece dificultad alguna idear un mecanismo en el que tanto la corriente de energía como la de materia pasen de *B* a *A*, pero en que *A* sea el que mande a *B*. Supongamos, por ejemplo, que *B* tenga un compresor que introduzca en forma continua aire en un cilindro, dando origen a una presión legible sobre un limbo graduado, y que del cilindro parta un tubo hasta *A*, en donde se halle una válvula que permita escapar parte del aire y regule así la presión de éste en el cilindro; si llega una persona ajena y se pone a estudiarlo sin saber nada de su mecanismo interno, someterá a ensayo la relación entre las dos variables: *A*, posición de la válvula, y *B*, lectura del limbo. Así pues, cuando el sistema es tal que todos los componentes tienen energía abundante a su disposición, la dirección de mando no guarda una relación necesaria con la dirección de paso de la energía ni de la materia.

La independencia

12/3. De hecho, el criterio de independencia puede formarse a partir de resultados de operaciones primarias (cf. 2/10), sin referencia a otros conceptos ni a conocimientos algunos recogidos de otras fuentes.

La definición básica simplemente expresa de modo formalizado lo que hemos empleado de manera intuitiva en 4/12. Para comprobar si una variable, *X*, ejerce efecto sobre otra, *Y*, el observador coloca el sistema en un estado, deja que se produzca una transición y toma nota del valor de *Y* que aparezca tras ésta (el nuevo valor de *X* carece de importancia); luego dispone el sistema en un estado que difiera del primero únicamente en el valor de *X* (en particular, es preciso que *Y* vuelva a su estado original), permite de nuevo que se produzca una transición y anota otra vez el valor resultante de *Y*. Así se obtie-

nen dos transiciones de esta última variable a partir de dos estados que sólo se diferencian por el valor de *X*: si los dos valores de *Y* coinciden, decimos, por definición, que esta variable es **independiente** de *X* para los estados iniciales y otras condiciones que hayan concurrido.

Con **dependiente** queremos simplemente decir "no independiente".

Este criterio operacional nos proporciona el "átomo" de independencia; para él son necesarias dos transiciones (sin las cuales el concepto de "independencia" carece de sentido).

12/4. En general, el resultado obtenido con esta prueba al aplicarla a un par de estados iniciales no impone ninguna restricción sobre lo que pueda ocurrir en caso de que se aplique a otras parejas: no podemos excluir la posibilidad de que sus resultados puedan variar en forma arbitraria entre todas las parejas pertinentes de estados. Sin embargo, es frecuente que, dados unos valores de todas las demás variables o parámetros, *Z*, *W*, ..., se observe la independencia de *Y* con respecto a *X* para *todos* los pares de estados iniciales que difieran sólo en cuanto al valor de *X*; en este caso, *Y* es **independiente** de *X* (para aquel campo particular y para aquellos valores particulares de los parámetros y las demás variables) en un sentido más amplio que el anterior: supuesto que ni el campo ni los valores iniciales de *Y*, *Z*, *W*, etc., sufran modificaciones, la transición de *Y* no está afectada por el valor inicial de *X*. En este caso, *Y* es independiente de *X* en una región (del espacio de fases) representada por una línea paralela al eje de las *X*: "independiente" en el sentido de que, cualquiera que sea el punto representativo que al seguir su línea de comportamiento abandone esta región, *Y* sufrirá siempre idéntica transición.

En ocasiones puede suceder que *Y* no sólo sea independiente de *X* para todos los valores de esta última variable, sino asimismo para todos los de las demás y los parámetros (*Z*, *W*, etc.): así como en el caso anterior un cambio de valor de *Z* podría haber cambiado el campo o la región de éste, de modo que *Y* dejase de ser independiente de *X*, ahora la transición de *Y* (a partir de un valor fijo de esta variable) será la misma, cualesquiera que sean los valores iniciales de *X*, *Z*, *W*, etc.: *Y* es incondicionalmente **independiente** de *X*.

Vemos, pues, que dos variables pueden ser "independientes" en grado variable: en dos puntos, en una línea, en una región, en todo un estado de fases o en un *conjunto* de campos. Este término es capaz, por consiguiente, de aplicarse en grados muy distintos; y las definiciones dadas arriba no pretenden responder a la cuestión (de dudo-

sa validez) sobre "qué es *realmente* la independencia", sino meramente poner de manifiesto el modo en que debe emplearse este vocablo para que el hablante transmita un mensaje inequívoco a su auditorio. Es evidente que a menudo se necesitará una especificación suplementaria (por ejemplo, ¿qué es lo que quiere decir "Y independiente de X": entraña "en este campo" o "en todo campo"?); y es preciso que se dé ésta, bien sea por el contexto o explícitamente.

Así pues, la palabra "independiente" se parece a la de "estable": ambas suelen ser útiles, ya que proporcionan rápida y fácilmente información acerca de un sistema *cuando éste es suficientemente sencillo* y cuando se sabe que el oyente las va a interpretar del modo apropiado. Pero si no es sencillo, el hablante tiene que estar siempre dispuesto a añadir detalles complementarios o incluso a describir las transiciones mismas (que son lo seguro, ya que nos dan la información completa).

12/5. Por haber varios grados de independencia (de suerte que Y puede ser independiente de X en una región reducida del campo y no serlo si se amplía éste), se sigue que un solo sistema puede dar lugar a varios diagramas de efectos inmediatos, tantos como gamas y condiciones de independencia se consideren. Ello no es agradable para nosotros, pero se trata de un hecho que no podemos eludir. (Afortunadamente, suele suceder que las independencias que nos interesan conducen aproximadamente al mismo diagrama, de forma que, con frecuencia, uno solo de éstos representa todos los aspectos importantes de la independencia).

12/6. Hasta ahora hemos tratado de la independencia de Y respecto de X; cualquiera que ésta sea, no entraña restricción alguna, en general, sobre la posible independencia o no independencia de X con respecto a Y. Si X es independiente de Y pero esta última variable no lo es de aquélla, X **domina** a Y.

12/7. La definición hasta ahora dada se refiere a la independencia entre dos variables. Puede ocurrir que todas las variables de un sistema, A, sean independientes de todas las de otro, B (si se tienen en cuenta todas las parejas de variables que se puedan formar); y decimos entonces que el sistema A es **independiente** del B.

Tampoco aquí coarta tal independencia las posibilidades en cuanto a que B sea o no independiente de A; y este último sistema puede **dominar** al primero.

12/8. Presentemos algunos ejemplos que ilustren la utilidad de la definición y hagan ver que las respuestas que proporciona concuerdan con la experiencia corriente.

Si un bacteriólogo quiere comprobar si una substancia química afecta al crecimiento de un microorganismo, preparará dos tubos con medio nutritivo, en los que se encuentre aquella substancia en concentraciones diferentes (X), pero que sean iguales en cuanto a los demás constituyentes, y observará cómo varían con el tiempo las cantidades respectivas (Y); comparará luego las dos cantidades finales de tales organismos obtenidas partiendo de dos estados iniciales distintos solamente en lo que respecta a la concentración del producto químico.

Para someter a ensayo si un sistema determinado por estados depende de un parámetro — es decir, para ver si éste es "efectivo" —, el observador registra el comportamiento del sistema en dos ocasiones en que tal parámetro tenga valores diferentes. Así, para someter a contraste si el regulador de un termostato afecta realmente a éste, coloca aquél en un valor determinado, comprueba que la temperatura tiene la magnitud normal y registra su comportamiento subsiguiente; luego la vuelve a su valor anterior, cambia la posición del regulador y observa de nuevo: un cambio de comportamiento implica que el regulador es efectivo.

Finalmente, un ejemplo tomado del comportamiento animal. Parker ha estudiado la anémona marina, para ver si el comportamiento de los tentáculos era independiente de su unión al cuerpo.

> "Cuando se colocan pequeños trozos de carne en los tentáculos de una anémona de mar, estos órganos se enroscan alrededor de las partículas alimenticias y, doblándose en la dirección apropiada, las llevan a la boca."

(Asienta así que este comportamiento es regular, y que el sistema formado por las posiciones del tentáculo y el alimento está determinado por estados. Describe la línea de comportamiento que sigue al estado inicial, o sea, el que corresponde al tentáculo extendido con el alimento sobre él.)

> "Si se sujeta ahora con unas pinzas un tentáculo en extensión de una anémona marina en calma y desplegada, se lo corta y se lo mantiene en una posición tal que se recuerden claramente sus relaciones originales con respecto al conjunto del animal, se verá que el tentáculo sigue efectuando una respuesta cuando se pone alimento en

> contacto con él, y que acaba por girar hacia el lado en que inicialmente se encontrase la boca."

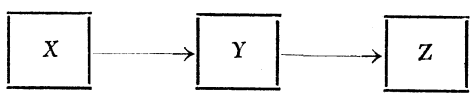
(Ahora ha descrito la línea de comportamiento que sigue a un estado inicial idéntico al primero, salvo por tener otro valor el parámetro "unión al cuerpo", y ha observado que los dos comportamientos de la variable "posición del tentáculo" son idénticos.) Deduce que el sistema del tentáculo es, a este respecto, independiente del formado por el cuerpo:

> "Así pues, el tentáculo posee dentro de sí un mecanismo neuromuscular completo al servicio de sus propias respuestas."

Esta definición, por tanto, está de acuerdo con lo que suele aceptarse; y aun cuando es algo desmañada en casos muy sencillos, en los complicados tiene la ventaja de servirnos de fundamento claro y preciso: mediante su empleo pueden probarse las independencias que existan en un sistema valiéndose exclusivamente de operaciones primarias.

12/9. Esta definición hace depender la "independencia" del modo de comportarse del sistema a lo largo de una sola unidad de tiempo (de un solo escalón si las modificaciones se producen escalonadamente, y de un tiempo infinitesimal en caso de que el cambio sea continuo). Y las dependencias, determinadas de este modo, que se encuentren entre todas las parejas de variables, proporcionan el diagrama de efectos *inmediatos,* tal y como se ha definido en el apartado 4/12.

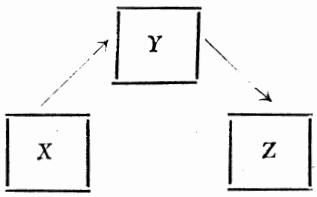
En general, este diagrama no sufre ninguna restricción: pueden aparecen en una gran variedad de máquinas todas las formas susceptibles de dibujarse; pero esta libertad no es siempre posible si consideramos la relación existente entre dos variables a lo largo de un período de tiempo bastante largo. En efecto, supongamos que Z dependa de Y y que Y dependa de X, de modo que tengamos las siguientes flechas del diagrama de efectos inmediatos:



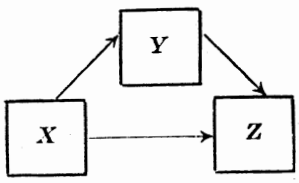
X puede no ejercer efecto *inmediato* alguno sobre Z, pero en dos etapas la relación entre ambas no es enteramente libre: pues dos valores iniciales distintos de X conducen, transcurrida la primera etapa, a

dos valores distintos de Y, y éstos llevan (por depender Z de Y) a dos valores de Z también distintos; así pues, lo mismo si *X* tiene un efecto inmediato sobre Z que si no lo tiene, en dos etapas los cambios de aquella variable dan lugar a cambios en ésta, de suerte que *X* ejerce efecto sobre Z, si bien con cierta demora.

Por tanto, es posible otra clase de independencia, referente a si los cambios que se produzcan en *X* están seguidos en *algún* momento por cambios de Z — relaciones que pueden representarse por un **diagrama de efectos últimos.** —. Es preciso discriminar cuidadosamente este diagrama del de efectos inmediatos, pero no carecen de relación entre sí; pues a partir de éste puede formarse aquél añadiendo más flechas que obedezcan a la regla de que si hay ya dos flechas tales que una empiece donde la otra termine,



se dibuje una tercera que empiece donde lo haga esta última y acabe donde acabe la primera, como se indica a continuación:



(Esta regla ha de aplicarse reiteradamente hasta que ya no sea posible añadir más flechas.) Por tanto, el diagrama de efectos inmediatos de la figura 12/9/1, I, da origen al de efectos últimos de la misma figura, II.

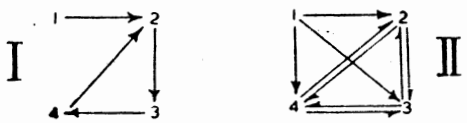


FIGURA 12/9/1.

El diagrama de efectos últimos hace patente de un golpe de vista las dependencias que se producen cuando damos tiempo a que los

efectos circulen por todo el sistema. Así, en la figura 12/9/1, II, vemos que la variable 1 tiene una independencia permanente de 2, 3 y 4, y que estas tres últimas dependen, en última instancia, unas de otras.

Efectos de la constancia

12/10. Supongamos que se hayan enlazado ocho variables por el método del apartado 6/6, dando el diagrama de efectos inmediatos que se ve en la figura 12/10/1. Preguntamos: ¿qué *comportamiento* de las

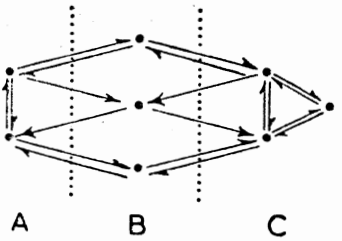


FIGURA 12/10/1.

tres variables de la zona *B* hará que *A* y *C* sean independientes (también en última instancia) y que al mismo tiempo estén determinadas por estados? Esto es, ¿qué comportamiento de *B* escindirá el todo en partes independientes, de modo que el diagrama de efectos inmediatos sea el de la figura 12/10/2?

FIGURA 12/10/2.

Esta pregunta no solamente tiene importancia teorética, sino práctica; muchos experimentos requieren que un sistema quede a cubierto de los efectos provinentes de otros; así, un sistema que utilice imanes puede necesitar que se lo proteja de los efectos del magnetismo terrestre; acaso habrá que aislar un sistema térmico de los cambios de temperatura de la atmósfera; o bien será preciso mantener la presión que hace circular la sangre por los riñones independiente de las variaciones del ritmo del pulso.

Lo primero que podría sugerirse es que se eliminen las tres variables de *B*; pero esta supresión conceptual no responde a ninguna realidad física; no se pueden "eliminar" ni el campo magnético terrestre, ni la temperatura de la atmósfera ni el pulso. En realidad, cabe demostrar (véase 22/14) la respuesta a tal cuestión: *para que A y C sean independientes y se hallen determinadas por estados es necesario y suficiente que las variables de B sean funciones nulas.* Dicho de otro modo, *A* y *C* tienen que estar separadas por un *muro de constancias.*

De ello se sigue que si las variables de *B* pueden fluctuar a veces y a veces permanecer constantes (esto es, si se comportan como funciones parciales), *A* y *C* pueden encontrarse en unas ocasiones funcionalmente enlazadas y en otras ser independientes, según sea el comportamiento de *B*.

12/11. Veamos algunos ejemplos ilustradores de que este teorema está de acuerdo con la experiencia ordinaria.

a) Si *A* (de la figura 12/10/1) es un sistema en el que se estudian cambios de temperatura, *B* está formado por las temperaturas de las distintas partes del recipiente y *C* por las de los alrededores de éste, para que *A* esté aislado de *C* y determinado por estados es necesario y suficiente que *B* se mantenga constante. *b*) Dos sistemas eléctricos enlazados por un aislador son independientes (en caso de que las variaciones sean bastante lentas), pues desde el punto de vista eléctrico el aislador no varía. *c*) Con frecuencia se independizan los centros de la médula espinal de las actividades del encéfalo interrumpiendo transversalmente aquélla; pero no es necesario efectuar una solución de continuidad física: basta actuar sobre un tramo de ella mediante un tóxico, anestesiándolo o congelándolo; lo único que se necesita es que dicho tramo no experimente variaciones.

La separación física, que, como hemos visto, no garantiza que haya independencia, tiene a veces eficacia por crear una zona intermedia de constancias.

12/12. El ejemplo de la figura 12/10/1 nos ha permitido observar un modo en que el comportamiento de un conjunto de variables puede, gracias a su fluctuación de unas ocasiones a otras, afectar a las posibles independencias dentro del sistema. Pero existe toda una gama de modos de ocurrir tal cosa.

Para hacer patente toda esta variedad necesitamos una regla por la que podamos hacer las modificaciones apropiadas en el diagrama de efectos últimos cuando se mantengan constantes una o más variables.

La regla es la siguiente: tomemos el diagrama de efectos inmediatos; si una variable, *V*, permanece constante, quítense todas las flechas que acaben en *V* y luego, considerando este diagrama modificado como si fuese de efectos inmediatos, compléteselo (aplicando la regla del apartado 12/9) para formar el de efectos últimos: el diagrama resultante representará, en realidad, tales efectos cuando *V* sea constante. (Adviértase que el efecto que se produce al hacer *V* constante no puede deducirse únicamente del diagrama original de efectos últimos.) De modo que si el sistema de la figura 12/12/1 tiene el diagrama de efectos inmediatos *A*, el de efectos últimos será *B*, *C*, *D* o *E*, según sean las variables que permanezcan constantes: ninguna, 1, 2 ó 1 y 2.

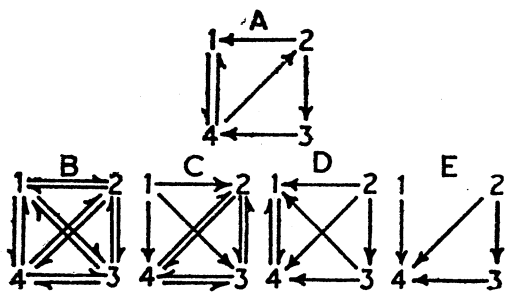


FIGURA 12/12/1. — Si un sistema de cuatro variables tiene el diagrama de efectos inmediatos representando en *A*, y si 1 y 2 son funciones parciales, su diagrama de efectos últimos será *B*, *C*, *D* o *E*, según permanezcan inactivas, respectivamente, ninguna variable, 1, 2, o tanto 1 como 2.

Puede observarse que disponiendo de cuatro variables y haciendo que únicamente dos de ellas puedan permanecer constantes, se llega a una notable variedad de posibles configuraciones de independencia: así, en *C* 1 domina a 3, pero en *D* es 3 la que domina a 1. Y cuando el número de variables aumenta, crecen rápidamente las posibilidades.

12/13. La multiplicidad de interconexiones posibles de una central telefónica se debe primariamente a que utiliza en gran medida constancias temporales. Este ejemplo sirve para recordarnos que la "conmutación" es meramente uno de los cambios que pueden producirse redistribuyendo las constancias; pues supongamos que un sistema posea el diagrama de efectos inmediatos representado en la figura 12/13/1: si un efecto procedente de *C* pasa a la rama *AD*, para que la *BE* sea independiente es preciso que *B* se mantenga constante (cualquiera que sea el medio de conseguir esta constancia); y cuando el efecto procedente de *C* se "conmuta" a la rama *BE*, *B* tiene que quedar libre y *A* conver-

tirse en constante. Por consiguiente, *un sistema cuyas variables puedan fluctuar en unas ocasiones y permanecer constante en otras es apto para efectuar conmutaciones.*

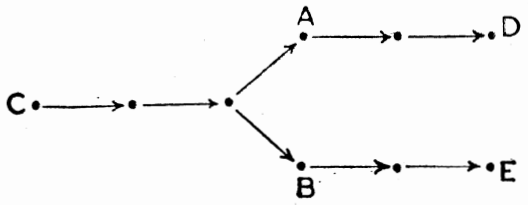


FIGURA 12/13/1.

Efectos de las estabilidades locales

12/14. En los últimos apartados se ha puesto de manifiesto la importancia que poseen, en cualquier sistema que haya de tener independencias temporales, las variables que temporalmente permanezcan constantes; y como estas variables desempeñan un papel fundamental en lo que sigue, vamos a estudiarlas más de cerca.

Cualquier subsistema (incluyendo el caso de la variable única) que permanezca constante se encuentra, por definición, en un estado de equilibrio; si las condiciones circundantes (los parámetros) son constantes, semejante estado pertenece al campo correspondiente, y si la constancia del sistema se produce mientras los parámetros cambian, tal estado es de equilibrio, evidentemente, en todos los campos que aparezcan en tales circunstancias. Así pues, la constancia de un estado de un subsistema implica que dicho estado es de equilibrio, y en presencia de pequeñas perturbaciones impulsoras implica que es de estabilidad.

La inversa es también verdadera: si un subsistema se encuentra en un estado de equilibrio permanecerá en él, esto es, se conservará constante (mientras los parámetros no cambien de valor).

Constancia, estabilidad y equilibrio se encuentran, pues, en relación sumamenta estrecha.

12/15. ¿Son frecuentes tales variables (o subsistemas)? Más adelante (en 15/2) indicaremos nuestra opinión de que están muy extendidos y presentaremos varios ejemplos; ahora vamos sólo a señalar dos tipos que merecen mención especial.

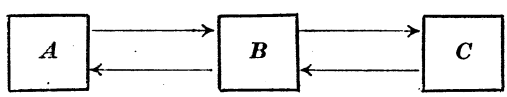
Una de estas formas, que acaso no sea frecuente en el mundo real, pero que tiene una importancia fundamental como forma tipo de la

estrategia del apartado 2/17, es aquélla en la que el subsistema posee una probabilidad definida, *p*, de que un estado cualquiera, elegido aleatoriamente, sea de equilibrio; de ellas nos ocuparemos en 13/2. (Como aclaración conviene decir que el espacio de muestreo para las probabilidades es el formado por un *conjunto* de subsistemas cada uno de los cuales sea una máquina con entrada, y que, por tanto, se encuentre determinado en él el que un estado dado — con un valor determinado de la entrada — sea o no de equilibrio.) Podría ocurrir este caso cuando el observador se enfrente con un sistema que sea (o que se pueda suponer razonablemente que es) una máquina determinada con entrada, pero sin que sepa qué subsistema es el que se encuentra ante él (de todos los del conjunto posible): una vez hallado el espacio de muestreo (mediante una ponderación apropiada del conjunto), el observador podría hablar legítimamente de la probabilidad de que *este* subsistema, en *este* estado y con *esta* entrada, se encuentre en equilibrio.

La otra forma, mucho más corriente, es aquélla dotada de un "umbral", de modo que *todos* los estados sean de equilibrio cuando cierta función de los parámetros sea inferior a un valor determinado, y muy pocos o ninguno lo sea cuando exceda de este valor. Como ejemplos muy conocidos podemos recordar que un peso no se separa del suelo hasta que la fuerza que tienda a levantarlo no supere cierto valor, y que un nervio no responde con un impulso hasta que la intensidad eléctrica — en una forma especial — no sea mayor que una magnitud determinada.

Lo que importa para nosotros es advertir que el umbral, debido a dar origen fácilmente a una constancia, puede proporcionar sin dificultad cuanto es necesario para que las conexiones entre una variable y las otras sean temporales. Así, los cambios del diagrama de la figura 12/12/1 podrían muy bien estar causados por partes en que se encontrase el fenómeno del umbral.

12/16. Podemos ahora conjugar estas deducciones con las del apartado 12/10. Si se enlazan tres subsistemas de suerte que su diagrama de efectos inmediatos sea



y si *B* es un estado de equilibrio para todos los valores procedentes de *A* y *C*, estos dos últimos subsistemas son (incondicionalmente) in-

dependientes. De modo que si *B* se encuentra en un estado de equilibrio, *corta la relación funcional entre A y C.*

Supongamos ahora que los estados de *B* sean de equilibrio para ciertos estados de *A* y *C*, pero no para otros; al pasar estos dos últimos subsistemas por valores diversos, conforme el sistema total se desplaza a lo largo de cierta línea de comportamiento, unas veces serán dependientes y otras independientes (según sea de equilibrio o no el estado que *B* tenga en el momento).

Así pues, hemos alcanzado el primer objetivo de este capítulo: hacer que esté perfectamente claro, y sea patentizable mediante operaciones primarias, lo que se quiere decir con "conexiones funcionales temporales" cuando la regulación procede de factores interiores al sistema — esto es, no se encuentra impuesta arbitrariamente desde el exterior —.

12/17. Podemos ampliar estas mismas ideas para que abarquen cualquier sistema, aunque sea todo lo grande y posea toda la abundancia de conexiones que nos plazcan. Partamos de que conste de muchas partes — o subsistemas — enlazadas como se ha indicado en el apartado 6/6 y, por consiguiente, dotadas de ciertas conexiones básicas; si algunas de las variables o de los subsistemas permanecen constantes a lo largo de cierto tiempo, mientras éste dure las conexiones que los atraviesen estarán reducidas funcionalmente a cero, y el efecto es el mismo que si se encontrasen materialmente cortadas durante ese período.

Si una proporción elevada de las variables se mantiene constante, estas divisiones pueden alcanzar tal intensidad que el sistema total quede escindido en subsistemas que (temporalmente) sean por completo independientes unos de otros. Dicho de otro modo: *las constancias pueden escindir un sistema en trozos* (en *I. to C.*, apartado 4/20, se da un ejemplo de este hecho).

12/18. El campo de un sistema determinado por estados cuyas variables sean constantes tiene sólo la peculiaridad de que las líneas de comportamiento suelen encontrarse en un subespacio ortogonal a los ejes. Así, en un intervalo en el que todas las variables menos una sean constantes, la línea de comportamiento correspondiente tiene que seguir una recta paralela al eje de la variable que cambie; si todas menos dos permanecen inactivas (a lo largo de una línea de comportamiento), tal línea del espacio de fases puede curvarse, pero ha de permanecer en un plano paralelo a los dos ejes correspondientes; y así sucesiva-

mente. Si todas las variables permanecen constantes, la línea se convierte, como es natural, en un punto — el estado de equilibrio —. Así pues, un sistema de tres variables podría dar lugar a la línea de comportamiento representada en la figura 12/18/1.

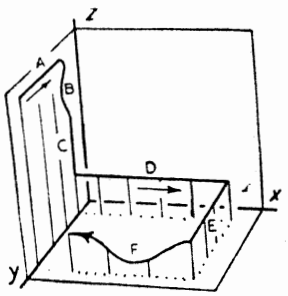


FIGURA 12/18/1. — En las distintas etapas las variables activas son: en *A*, *y*; en *B*, *y* y *z*; en *C*, *z*; en *D*, *x*; en *E*, *y*, y en *F*, *x* y *z*.

Antes de alcanzar el equilibrio, estas variables se comportan, desde luego, como variables parciales (cuya importancia se verá en los restantes capítulos). Para facilitar la mención, diremos que una función parcial (descrita a lo largo del tiempo por una variable) es **activa** o **inactiva** en un punto dado de una línea de comportamiento según cambie o permanezca constante tal variable.

Sistemas con estabilidades locales

13/1. Después de haber estudiado lo que son las "independencias parciales, fluctuantes y temporales dentro del todo", podemos considerar ahora algunas de las propiedades que presenta el comportamiento de un sistema de este tipo.

Al decir "un sistema de este tipo" no lo hemos definido con precisión, naturalmente, sino sólo un conjunto o clase de sistemas. ¿Cómo cabe aumentar la precisión? Podemos hacer dos cosas con tal fin.

Uno de los procedimientos es añadir detalles ulteriores, hasta que hayamos definido con toda precisión un sistema concreto cuyo comportamiento esté determinado, definido de modo unívoco, y seguir luego tal comportamiento en todos sus pormenores. Semejante estudio nos conduciría a una conclusión exacta, pero, a la vez, nos proporcionaría muchos más detalles de los que necesitamos — o de los que nos podemos ocupar satisfactoriamente — en los restantes capítulos.

Otro método consiste en hablar acerca de sistemas "en general": no hay nada más fácil que aflojar la tensión y hablar vagamente de lo que "suele" ocurrir, sin tener en cuenta que el hecho de que "suelan" presentarse unas propiedades particulares (tales como la linealidad o la existencia de un umbral) varía enormemente entre los sistemas del sociólogo, del neurofisiólogo y del físico. El rigor y la precisión son posibles al hablar de sistemas "en general" con tal de que se cumplan dos condiciones: es necesario que se defina con precisión el *conjunto* de sistemas de que se trate, y los enunciados que se formulen han de afirmar algo con precisión acerca de las propiedades del conjunto. Dicho de otro modo, abandonamos el objetivo de ser precisos acerca del sistema individual y asumimos la responsabilidad de serlo acerca del conjunto. Vamos a seguir sobre todo este segundo camino en los demás capítulos del libro.

Por haber pasado a este nuevo objetivo veremos con frecuencia que las argumentaciones acerca del conjunto se desarrollan del modo más sencillo posible apoyándose en algún sistema individual estudiado detalladamente. Ahora bien, cuando se sigue este proceder es necesario

estar en la inteligencia de que dicho sistema tiene importancia exclusivamente por ser el elemento genérico, típico o "aleatorio" del conjunto a que pertenezca; y aunque la argumentación parezca con frecuencia que se centra (verbalmente) en el sistema individual, en realidad se dirige a las propiedades del conjunto, y aquel sistema constituye sólo un medio con vistas a un fin.

Vamos a tener que ocuparnos mucho, en lo que sigue, de los sistemas construídos de un modo "aleatorio"; esta última palabra querrá decir siempre que trataremos un sistema *genérico* de forma tal que encontremos sus propiedades *típicas* y que lleguemos a alguna deducción precisa acerca del *conjunto* de sistemas definido.

13/2. Un conjunto de sistemas que tiene una importancia especial para los capítulos posteriores es el formado por aquellos sistemas constituídos por partes que tengan una gran proporción de estados de equilibrio y que estén enlazadas entre sí aleatoriamente.

Dicho con mayor precisión: supongamos que tenemos ante nosotros un gran número de partes bastante homogéneas, de suerte que exista un "universo" definido (o distribución definida) de ellas; asumimos que cada una está determinada por estados y que, por tanto, *carece enteramente de aleatoriedad*: se tratará, pues, de una pequeña máquina con entrada y, por tanto, si se encuentra en cierto estado y en unas condiciones determinadas, hará ciertas cosas, que ejecutará siempre que dicho estado y tales condiciones se repitan.

Tomamos ahora una muestra de tales partes mediante un proceso de muestreo definido con toda nitidez y llegamos así a un conjunto determinado de partes (no suponemos que todas tengan igual probabilidad de ser escogidas); volvemos a tomar otra muestra (esta vez de todas las maneras posibles de enlazarlas), valiéndonos de un proceso de muestreo definido de modo perfectamente neto, y llegamos así a cierto modo de enlace entre ellas.

Este conjunto concreto de partes enlazadas entre sí de una manera concreta nos conduce al sistema final.

Es preciso darse cuenta de que este sistema está determinado por estados: *no* es estocástico (en el sentido de que fuese capaz de efectuar, a partir de un estado dado y en condiciones dadas, diversas transiciones con probabilidades diversas); así pues, este sistema concreto no tiene nada de aleatorio. La aleatoriedad aparece con el observador o experimentador; le interesa muy poco el sistema concreto que se obtenga con el muestreo, y mucho, en cambio, la población de la que se haya tomado — como al neurofisiólogo le interesa el conjunto de los

cerebros de los mamíferos —: la "aleatoriedad" se introduce porque el observador se enfrenta con un sistema que le interesa sólo por ser típico del conjunto; y tomando la población como espacio de muestreo (derivado de los dos espacios de esta índole primarios) puede hablar legítimamente de la *probabilidad* de que en el sistema se produzca un acontecimiento determinado, o de que posea cierta propiedad.

Si a estas especificaciones añadimos la restricción de que las partes originales sean ricas en estados de equilibrio (por ejemplo, como ocurría en 12/15), llegamos a un tipo de sistema del que hemos de tratar frecuentemente a continuación y al que, a falta de mejor nombre, designaré con el sistema **poliestable.** Dicho brevemente, es cualquier sistema cuyas partes posean muchos estados de equilibrio y que esté formado tomando partes aleatoriamente y enlazándolas asimismo de modo aleatorio (supuesto que entendamos estas palabras en el sentido exacto que hemos indicado arriba).

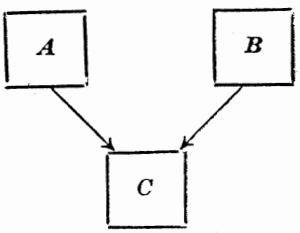
Sin embargo, las definiciones sólo pueden justificarse, en último término, por sus obras. En lo que resta de este libro se harán patentes algunas de las propiedades de este interesante tipo de sistema, que es clave dentro de la estrategia del apartado 2/17.

13/3. Para hacer patentes tales cosas no nos vamos a ocupar de un sistema concreto, especificado en todos sus detalles, sino de un conjunto. Cuando se estudia un conjunto hemos de recordar siempre cuidadosamente una distinción muy importante (y hemos de hacer ésta *nosotros,* arbitrariamente): ¿tratamos 1) de lo que *puede* ocurrir (caso en que concentraremos la atención en las posibilidades extremas y, por tanto, en lo raro y excepcional) ó 2) de lo que *suele* ocurrir (lo cual hará que nos volquemos sobre la masa central de casos, esto es, sobre lo corriente y ordinario)? Ambas posiciones tienen su utilidad, pero sus resultados son, con frecuencia, muy diferentes, por lo que hemos de tener mucho cuidado en no confundirlas.

13/4. *Todos* los sistemas determinados por estados poseen cierta propiedad, que tendrá bastante importancia más adelante; se trata de la siguiente: en todo sistema de esta índole si un subsistema ha permanecido constante y luego sus variables comienzan a cambiar, podemos deducir que entre sus parámetros tiene que haber alguno que haya experimentado alguna modificación al empezar los cambios de tal subsistema. Hablando plásticamente podríamos decir que el cambio procede sólo del cambio; y la razón de ello no es difícil de ver: si la variable o el subsistema C está afectado sólo inmediatamente por los

parámetros *A* y *B*, si éstos son constantes a lo largo de cierto intervalo y si en este mismo intervalo *C* ha pasado del estado *c* al mismo (es decir, si *c* es un estado de equilibrio), para que el comportamiento de *C* sea coherente tiene que continuar repitiendo la transición "de *c* a *c*" mientras los valores de *A* y *B* no se modifiquen; y si *C* está determinado por estados, sólo puede experimentar una transición de *c* a otro estado tras de que *A* o *B*, por la razón que sea, hayan cambiado en *su* valor.

Así pues, un subsistema determinado por estados que se halle en un estado de equilibrio y esté rodeado por parámetros constantes (que



acaso sean variables de otros subsistemas) se encuentra algo así como atrapado en el equilibrio: una vez en éste no puede escapar de él hasta que una fuente externa de cambios no le permita a él mismo experimentarlos. Las pavesas que zigzaguean al chamuscar papel constituyen un vívido ejemplo de esta propiedad; pues todas las zonas, aun siendo combustibles, son estables cuando están frías; una pavesa puede convertirse en dos y cabe que acontezcan otras varias cosas, mas en una zona fría no puede formarse punto incandescente alguno a menos que exista otro inmediatamente adyacente; mientras quede alguno no es posible acotar lo que puede suceder, pero si el todo llega a un estado de "carencia de pavesas", a partir de tal momento no sufrirá modificaciones.

El acercamiento al equilibrio

13/5. Consideremos ahora de qué modo se desplaza un sistema poliestable hacia su estado final de equilibrio. Desde cierto punto de vista no hay nada de qué tratar, pues si las partes están determinadas por estados y su enlace está definido, el conjunto total es un sistema determinado por estados que, en cuanto se lo abandone a sí mismo a partir de un estado inicial, irá a parar a un ciclo final o a un equilibrio

siguiendo una línea de comportamiento exactamente del mismo modo que en cualquier otro caso.

Sin embargo, el hecho de que el sistema poliestable tenga partes dotadas de muchos equilibrios (que frecuentemente permanecerán constantes durante cierto tiempo) da lugar a unos rasgos especiales, que merecen que les prestemos atención; pues, como veremos más adelante, ello entraña puntos de gran interés para el comportamiento de los organismos vivos.

13/6. Un artificio muy útil para examinar el comportamiento de estos conjuntos, que son algo complejos, es el de hallar el valor del índice de que vamos a hablar ahora mismo. En cualquier momento dado, el sistema total se encontrará en un estado definido, y, por tanto, lo mismo les ocurrirá a todas sus variables; mas el estado de cada una de éstas será o no uno de sus estados de equilibrio (en las condiciones a que den lugar las demás variables); y vamos a representar por i el *número de variables* que se hallen en un estado de equilibrio (si el total tiene n variables, es evidente que i tendrá que encontrarse en la gama que va de 0 a n).

Si i es igual a n, cada una de las variables se halla en un estado de equilibrio en las condiciones constituídas por las demás, de modo que el conjunto total está asimismo en un estado de equilibrio (cf. 6/8). Si no es igual a n, las otras variables (cuyo número será $n - i$) cambiarán de valor en el siguiente intervalo temporal, y se llegará a un nuevo estado del todo, en el que i poseerá un nuevo valor; así pues, al ir desplazándose el conjunto a lo largo de una línea de comportamiento, el valor de i cambiará también; y podemos adquirir una idea no desdeñable del comportamiento del todo atendiendo al de i conforme avance el tiempo.

13/7. El comportamiento de i está estrictamente determinado una vez que se hayan dado el sistema y su estado inicial. Sin embargo, en un conjunto de sistemas no es fácil caracterizar tal comportamiento, excepto en los dos extremos (en los que es sumamente sencillo y claro); y al comparar lo que ocurre en éstos llegaremos a entender lo que suceda en forma que será de valor inapreciable para los próximos capítulos, pues nos adelantará mucho en la solución del problema fundamental del capítulo XI. (Este método, de cerciorarnos de lo que ocurre en dos casos especialmente sencillos y claros, sigue la estrategia del apartado 2/17).

13/8. En un extremo nos encontramos con el sistema poliestable enlazado abundantísimamente, de modo que casi todas las variables estén enlazadas con casi todas las demás (y el diagrama de efectos inmediatos de semejante sistema permitiría ver que existirían casi todas las n $(n - 1)$ flechas). Consideremos el caso en que, como en 12/15, todo subsistema tenga una probabilidad bastante elevada, p, de hallarse en un estado de equilibrio, y en el que todas las probabilidades sean independientes; ¿cómo se comportará i? (Lo que queremos saber es qué ocurrirá por lo regular; lo que *pueda* suceder tiene poco interés).

La probabilidad de que una parte cualquiera se encuentre en un estado de equilibrio es p, por lo cual, si se tiene independencia (de las probabilidades), la de que el conjunto (de n variables) se halle en un estado de equlibrio será p^n (por 6/8); si el valor de p no es muy cercano a 1 y n es grande, esta cantidad será sumamente pequeña (cf. 11/4); por su parte, i tendrá ordinariamente un valor no muy distinto de $n\,p$ (es decir, una fracción p del total estará en todo momento en equilibrio), de suerte que la línea de comportamiento describirá una especie de marcha aleatoria [*random walk*] alrededor de este valor, y el conjunto llegará a un estado de equilibrio si y sólo si i alcanza, por casualidad, el valor extremo n. Por tanto, llegamos esencialmente a lo mismo a que habíamos llegado en el apartado 11/3: a un sistema cuyas líneas de comportamiento son largas y complejas, y cuyas posibilidades de llegar al equilibrio en un tiempo relativamente corto son, si n es grande, pequeñísimas; en el caso presente, el tiempo que tarde el conjunto en alcanzar un estado de equilibrio será enormemente largo, como lo era T_1 en el apartado que acabamos de citar.

13/9. Merece una atención especial lo que ocurre cuando i llega a alcanzar un valor elevado, pero no exactamente igual a n. Supongamos, por ejemplo, que valga 999 en un sistema del tipo que ahora nos ocupa y dotado de 1.000 variables; el conjunto se encontrará cerca del equilibrio, pero ¿qué sucederá exactamente? Una variable no está en equilibrio y cambiará de valor, mas como el sistema está abundantemente enlazado, la mayoría de las 999 restantes variables se encontrarán en condiciones distintas en el instante (o en el paso) siguiente, y el que el estado en que cada una de ellas se encuentre *ahora* sea de equilibrio o no depende de factores que tienden a hacer que 999 p sea, como antes, el número de variables en equilibrio (por hipótesis); de modo que lo previsible es que i retroceda, simplemente, a su valor medio. Así pues, la forma del sistema poliestable abundantemente enlazado no es siquiera capaz, en caso de que llegue a acercarse mucho

al equilibrio (en el sentido de que la mayoría de sus partes estén en él), de conservar esta proximidad, sino que, casi con toda seguridad, retrocederá al estado esperable por término medio; se trata de un sistema que típicamente es incapaz de retener los aciertos parciales o locales.

13/10. Confrontemos el comportamiento estudiado en el apartado anterior (en el que suponíamos que el sistema estaba abundante o totalmente enlazado) con el correspondiente a un sistema poliestable en el que, aun siendo n también muy grande y las probabilidades p independientes, los enlaces primarios entre variables sean escasos. (Asimismo se llega a un sistema parecido cuando p está muy próximo a 1; pues, por lo dicho en 12/17, como la mayoría de las variables se encontrarán en estados de equilibrio y, por consiguiente, serán constantes la mayor parte del tiempo, las conexiones funcionales serán en número muy reducido). ¿De qué forma se comportará i en este caso, especialmente cuando la rareza de los enlaces se aproxime al límite?

Consideremos el caso en que la rareza haya alcanzado éste. Entonces, el sistema será idéntico a uno de n variables que no tenga conexiones algunas entre ellas, y será un "sistema" sólo nominalmente: en él, cualquier parte que llegue a un estado de equilibrio allí se mantendrá, pues ninguna perturbación puede alcanzarlo; de modo que si se comparan dos estados del todo, uno anterior y uno posterior, todas las partes que contribuyan en el primero a formar i también contribuirán en el segundo; así pues, *el valor de* i *no puede disminuir con el paso del tiempo;* y, desde luego, normalmente aumentará. Por tanto, este tipo de sistema se acerca *progresivamente* a su estado final de equilibrio; acercamiento progresivo que, en realidad, es como el del caso 3 del apartado 11/5, ya que el equilibrio final tiene que esperar solamente a la parte que tarde más; y, por consiguiente, el tiempo que necesite el conjunto será semejante a T_3, o sea, no excesivamente largo.

13/11. Estos dos tipos del sistema poliestable constituyen dos polos opuestos, y los sistemas del mundo real sólo muy rara vez corresponderán exactamente a ninguno de ellos; no obstante lo cual, tienen gran importancia, en virtud de la estrategia de 2/17, ya que constituyen tipos definidos de modo tajante, con propiedades perfectamente definidas y netas; y si un sistema real se parece a uno de los dos, podemos inferir legítimamente que sus propiedades se aproximarán a las de aquél a que se asemeje más.

Los sistemas poliestables a medio camino entre estos dos presentarán un aspecto algo confuso: se formarán subsistemas (por ejemplo, como los de 12/17) de caleidoscópica variedad, que persistirán solamente breves instantes; otros serán estables durante un breve intervalo, para cambiar luego y desintegrarse como tales subsistemas delimitables. El número de variables estables, *i*, tenderá a ascender mientras unos pocos subsistemas se mantengan estables, pero, con todo, caerá de nuevo en mayor o menor cantidad en cuanto algunos se conviertan en inestables; y las oscilaciones serán muy grandes, hasta que en uno de los bandazos acontezca que *i* se plante en el valor *n*, en donde se quedará fijo.

Mucho más interesante para nosotros son los sistemas cercanos al límite de la desconexión, en los que la tendencia de *i* a aumentar por acumulación será más marcada, de forma que esta magnitud, aun con ciertas oscilaciones y descendiendo con frecuencia un poco, mostrará una tendencia apreciable a acercarse al valor *n*; se trata del tipo de sistema que, una vez que el experimentador lo ha visto volver repetidamente a *n* tras los desplazamientos, le hace tener la sensación de que "intenta" llegar a *n*.

13/12. Hasta ahora nos hemos ocupado sólo del primer caso del apartado 12/15; ¿qué ocurriría si el sistema poliestable contase de partes cuyos estados de equilibrio se caracterizasen por tener un umbral? Esta cuestión interesa especialmente al neurofisiólogo, si bien no tendrá tanto interés para quienes pretendan trabajar con sistemas adaptativos de otros tipos.

La presencia del umbral excluye el anterior supuesto de la independencia de las probabilidades; pues ahora el albur que corra una variable de encontrarse en un estado de equilibrio variará en forma de algún modo correspondiente a los valores de sus parámetros. En el caso de dos o más neuronas, la correspondencia será en una dirección si el efecto es de excitación, y en la dirección inversa si es inhibitorio (en caso de que haya una mezcla de modos excitatorios e inhibitorios, puede resultar algo que se aproxime a la forma independiente). Si quisiéramos desarrollar esta cuestión más a fondo, ello nos conduciría a mayores detalles de los pertinentes en esta panorámica; y, además, actualmente no puede decirse mucho sobre estos asuntos.

13/13. Resumiendo: si el sistema poliestable se compone de partes cuyos estados de equilibrio estén distribuídos independientemente de los estados de sus entradas, llega a un equilibrio definitivo siguiendo

un proceso que depende sobremanera del número de conexiones funcionales que tenga.

Cuando éstas son muy abundantes, la línea de comportamiento tiende a ser complicada y, si n es grande, enormemente larga, de forma que el todo tiende a requerir un tiempo sumamente dilatado para llegar al equilibrio; pues cuando tal línea encuentra un estado en que sea estable una cantidad extraordinariamente elevada de variables, no es capaz de retener el exceso de tal cantidad sobre su valor medio.

Cuando las conexiones son muy escasas (ya sea por haber pocos enlaces primarios o porque las partes sean constantes con gran facilidad), la línea de comportamiento tiende a ser corta, de modo que el conjunto llega en poco tiempo a un estado de equilibrio; pues cuando dicha línea alcanza un estado en que el número de variables estables sea extraordinariamente alto, tiende a retener este exceso durante cierto tiempo, y, por consiguiente, a acercarse a un equilibrio total por acumulación de equilibrios locales.

La dispersión

13/14. El sistema poliestable posee otra propiedad digna de que se la mencione específicamente.

Fijémonos en un fragmento de una línea cualquiera de comportamiento de tal sistema: podremos advertir si a lo largo de él cambia o no de valor cada una de las variables. Así, en la figura 12/18/1, en el fragmento constituído por los dos que designamos con B y C, cambian y y z, pero x no lo hace; mientras que en el fragmento F cambian x y z, en tanto que permanece fija y; pues bien, con el nombre de **dispersión** me voy a referir al hecho de que las variables activas del primer fragmento (la y y la z) no sean idénticas a las del segundo (la x y la z). (En este ejemplo se trata de dos fragmentos de una sola y única línea, pero también podrían pertenecer a dos líneas distintas). Como hace ver este mismo ejemplo, no implicamos que los dos conjuntos de variables no tengan ningún elemento común, sino únicamente que no sean idénticos.

En el apartado 13/17 veremos la importancia de la dispersión; ahora hemos de percatarnos de un rasgo esencial, que es el siguiente: aun cuando los dos fragmentos pueden arrancar de puntos que difieran sólo en una variable o en unas pocas (según sucedía en 12/13), los cambios resultantes son capaces de distribuir la activación (cf. 12/18) en conjuntos distintos de variables, es decir, en lugares distintos del

sistema; así, pues, el importante fenómeno de que diferentes *configuraciones* (o *valores*) que aparezcan en un mismo lugar conduzcan a activar *lugares* diferentes del sistema no exige ningún mecanismo especial — cualquier sistema poliestable tiende a presentarlo.

13/15. Si los dos lugares se encuentran imbricados en grado mínimo, y si el sistema no está proyectado especialmente para separar configuraciones de entrada determinadas, todo cuanto se necesita es que casi todos los estados de las partes sean de equilibrio; en tal caso, sólo un número pequeño será activo; si la fracción activa del número total de variables suele ser aproximadamente r, y si las variables activas están distribuídas de forma independiente, la fracción común a ambos conjuntos (esto es, la magnitud de la imbricación) valdrá poco más o menos r^2, cantidad que puede ser tan pequeña como queramos sin más que reducir convenientemente r (lo cual puede hacerse haciendo las partes tales que la proporción de estados en equilibrio sea casi 1). De modo que, a dos estados de entrada distintos, el sistema poliestable puede responder con dos respuestas efectuadas por dos conjuntos de variables imbricados en muy pequeña medida.

13/16. Más adelante hemos de sugerir que el sistema nervioso utiliza ampliamente la dispersión. Veamos primero su empleo, también muy considerable, en los órganos de los sentidos.

El hecho de que éstos no sean idénticos impone una dispersión inicial; así, si se dirige sobre la cara un haz radiante de 0,5 μ de longitud de onda, los ojos se encontrarán afectados por un estímulo, pero no la piel, de modo que el nervio óptico quedará excitado, mientras que no lo será el trigémino; pero si la longitud de onda excede de 0,8 μ, la excitación pasa de aquel nervio a éste: se ha producido una dispersión, debida a que el cambio experimentado por el estímulo ha desplazado la excitación (actividad) de un conjunto de elementos anatómicos (variables) a otro.

En la piel se encuentran receptores sensibles al tacto, al dolor, el calor y el frío, todos los cuales pueden distinguirse entre sí histológicamente; por lo cual, si una aguja pasa de tocar ligeramente la piel a atravesarla, la excitación pasa del receptor de tipo "tacto" al de tipo "dolor", es decir, tiene lugar una dispersión.

Actualmente no sabemos con certeza si los cambios de color de los estímulos luminosos hacen pasar o no la excitación de un conjunto de elementos de la retina a otros; pero es indudable que se origina una dispersión cuando la luz cambia de posición en el espacio, pues si el

globo ocular no se mueve, la excitación se desplaza de un conjunto de elementos a otro. (En realidad, el cristalino es un dispositivo que garantiza la dispersión; y en la primitiva mancha luminosa de un protozoo ésta no puede producirse).

Por consiguiente, vemos que se impone una dispersión muy considerable antes de que los efectos de los estímulos alcancen al sistema nervioso central; los diferentes estímulos no sólo llegan a éste con cualidades diferentes, sino que frecuentemente lo hacen por caminos distintos, y excitan grupos distintos de células.

13/17. Es evidente que una importante función de los órganos de los sentidos es la de lograr una dispersión; y tenemos dos tipos de testimonios que apoyan la tesis de que ésta se logra o se mantiene en el sistema nervioso.

El hecho de que los procesos neuronales posean con frecuencia un umbral, y el de que esta propiedad implique que los elementos que funcionen sean a menudo constantes (véase 12/15), hacen pensar que la dispersión *tiene que* ocurrir (en virtud de lo dicho en 12/16).

Otro testimonio más directo consiste en el hecho de que, en los casos que conocemos, las vías que llevan de los órganos de los sentidos a la corteza cerebral al menos mantienen la dispersión que se haya producido en el órgano sensorial correspondiente: la representación puntual unívoca de la retina en el córtex visual, por ejemplo, asegura que la dispersión lograda en la retina no se pierda; y, análogamente, la representación puntual unívoca que ahora sabemos se consigue mediante la proyección del nervio auditivo sobre el córtex temporal garantiza que no se produzca una pérdida de la dispersión debida a la altura de tono. Por lo tanto, existen excelentes razones para creer que la dispersión desempeña un papel muy importante en el sistema nervioso.

La localización en el sistema poliestable

13/18. ¿Cómo se localizan en un sistema poliestable las respuestas a los estímulos?; ¿cómo se distribuye el conjunto de las variables activas sobre el conjunto total?

En este sistema, la reacción a un estímulo dado, que parta de un estado dado, tiene que ser regular y reproducible, ya que el todo está determinado por estados; y en esta medida su comportamiento

está sujeto a leyes. Pero lo más probable es que cuando el observador vea *qué* variables han sido activas le parezca que tal comportamiento escapa a toda legalidad, pues los pormenores de hacia dónde se extienda la activación habrán quedado determinados por el proceso de muestreo, y lo esperable es que las variables activas se hallen dispersas por todo el sistema en forma aparentemente azarosa (sujeta a lo dicho en 13/4). Así pues, la pregunta "¿está localizada la reacción?" es ambigua, ya que pueden dársele dos contestaciones diferentes; en el sentido de que la actividad se confina a ciertas variables del sistema total hay que responder que sí, pero atendiendo a que estas variables se presentan de un modo no susceptible de descripción sencilla es preciso decir que no.

Acaso sea útil, como ejemplo ilustrativo, el caso de la distribución sobre una ciudad de las chimeneas que "no tiren" (esto es, que sufran una inversión forzada de la aspiración) cuando sople el viento de una dirección determinada. El "tirar" o no de un chimenea concreta estará determinado localmente, puesto que un viento que tenga una fuerza y dirección concretas producirá con regularidad, al chocar con un ángulo determinado en las techumbres adyacentes, los mismos remolinos, que determinarán que aquella chimenea tire o no; pero geográficamente las chimeneas que no tiren no estarán distribuídas con arreglo a ninguna regularidad sencilla; pues si en un plano de la ciudad se marcan con puntos negros las chimeneas que no tiren con viento este, y mediante puntos rojos las que no tiren con viento oeste, es probable que unos puntos y otros se entremezclen en forma irregular. Por tanto, el fenómeno del "no tirar" se encuentra pormenorizadamente determinado, pero distribuído geográficamente de manera aleatoria.

13/19. Tal es la "localización" que advertimos en los sistemas poliestables. Y en la medida en que el cerebro —y, en especial, la corteza cerebral— corresponda a este tipo de sistemas podemos esperar que su "localización" sea de esta índole; en esta hipótesis, lo esperable sería que se comportase del modo que sigue.

Los acontecimientos que sucedan en su medio darán lugar a un aflujo continuo de información que, pasando por los órganos de los sentidos, se verterá en el sistema nervioso. Ordinariamente, el conjunto de variables activas en un instante diferirá del que se active en un momento posterior; y la actividad se extenderá e irá de un lado para otro con tan escaso orden aparente como las gotas de agua que

resbalan, juntándose y separándose, por los cristales de una ventana; pero aunque el ir de acá para allá parece carecer de orden, el todo es reproducible y está determinado por estados, de modo que si más tarde comienza de nuevo la misma reacción, iguales estímulos iniciales que antes tropezarán con iguales pormenores locales y darán lugar a iguales configuraciones que las ya aparecidas, las cuales entrarán en interacción con aquellos estímulos lo mismo que anteriormente, y, en consecuencia, el comportamiento se desarrollará como lo hubiere hecho la vez anterior.

Este tipo de sistema se vería afectado por extracciones de materia de una forma no muy desemejante a la que han hecho patente muchos investigadores del córtex cerebral. A este respecto son típicos los trabajos de Pávlov y de Lashley; el primero hizo que unos perros adquirieran varias respuestas condicionadas, les resecó parte de la corteza cerebral y observó los efectos que se producían sobre aquellas respuestas; Lashley enseñó a unas ratas a recorrer laberintos y a saltar dentro de unos orificios convenientemente marcados, y observó los efectos de ciertas operaciones quirúrgicas análogas a las anteriores sobre los hábitos así adquiridos. Los resultados fueron muy complicados, pero algunas tendencias generales quedaron muy claras; las intervenciones que afectan a un órgano sensorial, o a una de las partes del sistema nervioso que los impulsos procedentes de tal órgano primero atraviesen, suelen ser gravemente destructivas de las reacciones que utilice el órgano (así, la destrucción del conducto coclear, la sección de los nervios auditivos y la ablación de los lóbulos temporales suelen eliminar cualquier respuesta condicionada al sonido de una campana); también las reacciones que involucren cierto tipo de actividad motriz son enormemente vulnerables a los daños que sufra el centro de esta actividad; pero la ablación de corteza cerebral de otras partes del cerebro dió lugar a resultados muy vagos: casi cualquier resecación causaba perturbaciones, independientemente del lugar en donde se efectuara y de la respuesta o hábito que se estuviese sometiendo a ensayo, mientras que era imposible encontrar zona alguna cuya ablación aniquilase específicamente la respuesta o hábito en cuestión.

Estos resultados han dado origen a grandes dificultades en muchas teorías de los mecanismos cerebrales, pero no son incompatibles con la que proponemos aquí, pues en un sistema poliestable de gran magnitud la reacción total se basa en activaciones a la vez muy numerosas y sumamente dispersas. De modo que (si bien una aseveración precisa

requeriría que se la matizase muy cuidadosamente) podemos decir que, de igual modo que la industria inglesa del papel no quedaría detenida por la devastación de ningún condado aislado, una reacción basada en muchos elementos muy dispersos tenderá a ser más inmune frente a unos daños localizados que una que se apoye en un grupo compacto de pocos elementos.

13/20. Lashley se había dado cuenta de esta posibilidad en 1929, y señaló que las huellas mnésicas podrían estar individualmente localizadas sin que ello entrase en conflicto con los principales hechos conocidos, con tal de que hubiese muchas y de que estuviesen sumamente dispersas por la corteza cerebral —que su unificación fuese funcional y no anatómica—. Sin embargo, no desarrolló las consecuencias de esta posibilidad (por razones no difíciles de hallar cuando se considera lo que ella implica).

Semejante localización, naturalmente, no sería neta y ordenada; mas la mera falta de estas características, como tal, importa bastante poco; así, en una fábrica de automóviles podrían almacenarse las piezas de repuesto de modo que las lámparas piloto se encontrasen junto a los radiadores, y los ceniceros junto a las pistolas de engrase, pues la carencia de un orden notorio es indiferente con tal de que haya alguna manera de encontrar un artículo cuando se lo necesite. Los efectos de adjuntar una segunda reacción a la primera presentan para el córtex dificultades más graves, pues la dispersión meramente aleatoria no proporciona medio alguno de relacionar los lugares de una y otra; no solamente permite que unas reacciones emparentadas entre sí activen variables enormemente separadas, sino que carece de medios para mantener aisladas reacciones que no tengan nada que ver una con otra, e incluso permite que utilicen variables comunes. Ahora bien, no podemos suponer que las reacciones que carezcan de relación mutua son siempre tan distintas en sus formas sensoriales que se garantice una separación permanente de sus activaciones resultantes, pues dos estímulos pueden no tener relación alguna y, sin embargo, ser sumamente parecidos; y la diferenciación [entre tales reacciones] dista mucho de ser trivial, pues incluye el problema de decidir si unas pocas rayas verticales pertenecen a un cañaveral o a un tigre.

No solamente conduce la dispersión aleatoria a un entremezclamiento de subsistemas, con grandes probabilidades de interacción y confusión aleatorias, sino que cada acto nuevo de aprender aumenta la confusión; aun en caso de que se haya constituído cierto orden entre las reac-

ciones precedentes, para adjuntar una nueva reacción es preciso pasar por un período previo de ensayo y error al azar, que necesariamente hará que cambien los mecanismos de escalón que estuvieran ajustados a las reacciones anteriores (y éstas quedarán trastornadas). Por tanto, a primera vista, un sistema de esta índole está condenado a hundirse en el caos. Pese a ello, espero hacer ver, a partir del apartado 15/4, que existen razones muy aceptables para creer que, en realidad, su tendencia apunta hacia una adaptación cada vez mayor.

Estímulos reiterados y habituación

14/1. Aun cuando en el presente capítulo continuamos el estudio del sistema poliestable, constituye algo así como una digresión; y el lector que pase directamente al XV no perderá nada de la hilación lógica del libro. Pero se ha incluído aquí por dos razones.

La primera es que con él podemos adquirir cierta práctica en la comprensión de dicho sistema, haciéndonos ver cómo cabe estudiar los sistemas de tal tipo en forma al mismo tiempo general y precisa.

Una segunda razón consiste en que nos proporciona otro ejemplo de la tesis que penetra todo el libro. Cuando un sistema "alcanza el equilibrio", la primera impresión que tiene uno es que se ha acabado lo interesante (impresión que con frecuencia es válida cuando se trata de un sistema sencillo y de un equilibrio como el de un reloj al que se le haya agotado la cuerda); pero hay algo que se viene pasando por alto casi completamente, y que la presente obra pretende hacer patente: que cuando es un sistema *complejo* el que alcanza el equilibrio, éste implica necesariamente unas relaciones complejas entre los estados de sus distintas partes. Y al examinar estas relaciones se encuentran rasgos verdaderamente desusados y sorprendentes, que ofrecen un interés peculiar para el estudioso del comportamiento: así, el capítulo VIII, dedicado al homeóstato, presentaba "solamente" un sistema que alcanzaba el equilibrio (por ejemplo, en la figura 8/5/1); pero, debido a la estructuración del sistema y de sus condiciones, pudimos señalar diversas relaciones muy interesantes entre las acciones e interacciones de las distintas partes en el equilibrio final y en sus alrededores (relaciones que en el capítulo V habíamos identificado como "adaptación"). El presente capítulo nos mostrará otro ejemplo de cómo un sistema que "meramente" alcanza el equilibrio sometido a una entrada reiterada y compleja, da asimismo lugar a un comportamiento de interés psicológico y fisiológico.

14/2. Primero, una definición. Cuando un campo posee muchos estados de equilibrio, puesto que cada línea de comportamiento tiene que

terminar en *alguno* de tales estados (o en un ciclo), dichas líneas se reúnen en conjuntos tales que las que pertenezcan a uno de ellos desembocan en una terminación común (ciclo o estado de equilibrio). Por consiguiente, el campo total es divisible en regiones (o **confluencias**), de modo que cada una de ellas contenga un estado de equilibrio (o un ciclo) y uno sólo, en el cual acabe por desembocar toda línea de comportamiento. La propiedad principal de las confluencias es que si se abandona a sí mismo el punto representativo del sistema en un lugar cualquiera de una de ellas, *a*) no puede abandonar ésta y *b*) va a parar al estado de equilibrio (o al ciclo), en donde permanecerá mientras no varíen las condiciones paramétricas.

La división de la totalidad del campo en confluencias no es un rasgo privativo de las máquinas de algún tipo determinado, sino común a todos los sistemas determinados por estados y que posean más de un estado de equilibrio o ciclo.

La habituación

14/3. Consideramos ahora lo que ocurrirá si se aplica reiteradamente a un sistema poliestable un estímulo impulsor (cf. 6/5) invariable, S, de forma que los intervalos entre una aplicación y la siguiente sean lo suficientemente largos para que el sistema llegue al equilibrio entre cada dos de ellas.

En virtud de lo dicho en 6/5, el estímulo S, por ser impulsor, desplazará el punto representativo desde un estado a otro también definido; así pues, el efecto que produzca S (que, por lo que acabamos de decir en el párrafo anterior, actuará sobre el punto representativo cuando éste se halle en un estado de equilibrio) será el de trasladarlo a otro estado definido del campo y dejarlo allí libre (en la figura 14/3/1 bosquejamos unas posibilidades que aclaran suficientemente este proceso).

Supongamos que el sistema se halle en equilibrio en *A* y que se le aplique *S;* como resultado, el punto representativo se desplazará al extremo de la flecha, lo cual en nuestro ejemplo, lo llevará a otra confluencia. Por hipótesis, el sistema queda ahora abandonado a sí mismo hasta que se estabilice, lo cual quiere decir que el campo básico opera en esta región sobre él y lo hace ir a parar (en el ejemplo) al estado de equilibrio *B;* allí permanecerá hasta la próxima aplicación de S, que en nuestro caso lo transportará de nuevo a otra confluencia, en donde el campo básico lo conducirá al estado de equilibrio *C*. La alternancia

de *S* y del campo básico lleva de este modo el punto representativo de equilibrio en equilibrio hasta que llegue a *E*; a partir de este estado, *S* lo desplazará solamente a posiciones dentro de la misma confluencia, y al "dejarlo solo" volverá a *E*: pues como *S* (que, por hipótesis, ejerce siempre el mismo efecto) lo transporta ahora siempre al extremo de la flecha, ha de retroceder de nuevo hasta *E;* situación que es final, de

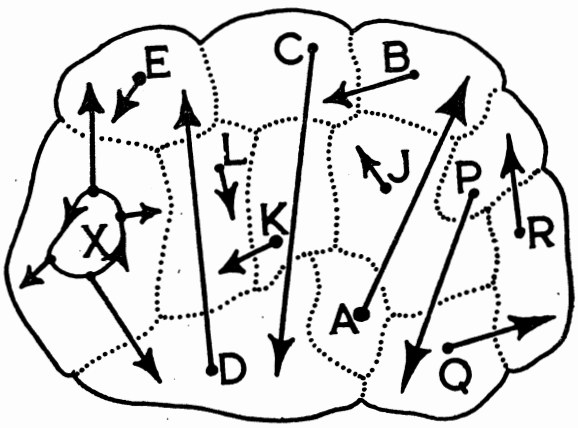


FIGURA 14/3/1. — Campo de un sistema con doce confluencias, cada una de ellas con un estado de equilibrio (representado por un punto) o un ciclo (*X*, en la parte de la izquierda). Las flechas indican los desplazamientos causados por *S* cuando este estímulo se aplica al punto representativo en un estado de equilibrio o en *X*.

modo que el punto representativo se encuentra ahora atrapado en la confluencia de *E*.

Podemos ver que este proceso es *selectivo*: el punto representativo acaba en una confluencia tal que el desplazamiento debido a *S* lo lleva a una posición *dentro* de la misma. Las confluencias tales como *A*, *C* y *D*, en las que el desplazamiento en virtud de *S* transporta al exterior, no son capaces de retener el punto representativo en este proceso, mientras que las del tipo de las *E*, *J* y *L* sí pueden atraparlo.

14/4. El diagrama del apartado anterior hace ver la existencia de dos complicaciones de las que debemos ocuparnos, para ser completos.

La primera consiste en que pueden presentarse los acontecimientos del extremo de la derecha, en donde el proceso de que nos ocupamos haría recorrer al punto representativo, de modo cíclico, las confluencias *P, Q, R, P, Q, R, P*...

La segunda está representada a la izquierda, en *X*, en donde la confluencia lleva a un ciclo; a partir de éste, *S* puede dar origen a

diversos desplazamientos, según sea el momento exacto en que se aplique (esto es, según sea exactamente la posición en que acontezca estar el punto representativo).

Sólo la experiencia puede decidir acerca de si tales ciclos (entre confluencias o dentro de ellas) son comunes o no en el sistema nervioso. En lo que se refiere a los situados *dentro* de una confluencia, como ocurre en el caso de *X*, difícilmente podrán afectar a las conclusiones que vamos a extraer; pues o bien todos los desplazamientos debidos a *S* llevarán dentro de la confluencia misma (caso en que el punto queda encerrado como hemos dicho antes) o bien tarde o temprano permitirán salir de ella (con lo cual no tendremos que ocuparnos más del ciclo); así, en la figura, a menos que el período del ciclo se encuentre en una relación sencilla con el de aplicación de *S* (lo cual tiene una probabilidad nula en caso de que ambos puedan variar continuamente), el punto representativo acabará por abandonar *X* y quedar, por fin, atrapado en *E*. (El ciclo que pasa por *P*, *Q* y *R* presenta unas complicaciones de las que cabe tratar en un debate más a fondo.)

14/5. La descripción que hemos hecho no es rigurosa (aunque no es difícil convertirla en tal): sólo pretende aclarar la tesis de que el sistema poliestable es *selectivo* cuando se le aplica reiteradamente un estímulo (siempre que la demora entre dos aplicaciones sucesivas sea suficiente para que el sistema alcance el equilibrio), ya que tarde o temprano se adhiere a un estado tal que *el estímulo es incapaz de sacarlo de la confluencia correspondiente;* y en caso de que haya continuidad y una métrica en el espacio de fases, la distancia a que el estímulo *S* acaba por desplazar el punto será *inferior a la distancia media,* ya que las flechas cortas se encuentran favorecidas. Así pues, la importancia de los cambios causados por las aplicaciones sucesivas de *S* pasan del valor medio a otro inferior a él.

No es necesario que intentemos presentar cálculos acerca de esta importancia, que pueden dejarse a los que estén especialmente interesados en ellos; mas lo que sí debemos advertir es que el resultado del proceso *no es simétrico.* En efecto: cuando pensemos en un sistema de partes aleatorias montado en forma aleatoria es fácil que deduzcamos que su respuesta a una estimulación reiterada tendrá iguales probabilidades de aumentar que de disminuir; pero el razonamiento anterior hace ver que ello no es así, sino que existe una tendencia fundamental a disminuir la respuesta.

Hay otro modo de argumentar, aunque mucho más débil, que puede

ayudar a que esta conclusión se haga más evidente. Podemos aceptar como axiomático que las respuestas de gran importancia tienden a causar un cambio mayor (o van unidas a un cambio mayor) en el sistema que las pequeñas; si las respuestas repercuten de algún modo en sus propias causas, las de gran volumen tenderán a causar cambios mayores en lo que les hiciese ser grandes, mientras que las pequeñas sólo actuarán en muy pequeña medida sobre los factores que les hicieran ser pequeñas; por tanto, los factores origen de la pequeñez poseen unas probabilidades de sobrevivir fundamentalmente mayores que los responsables del gran tamaño, y de aquí la tendencia a las dimensiones reducidas.

(Si este punto requiere un ejemplo que lo ilustre, podemos considerar la pregunta siguiente: de dos muchachos que fabriquen sus propios fuegos artificiales, ¿cuál tiene mayores posibilidades de sobrevivir: el que pretenda hacer los mayores que haya habido jamás o el que quiera preparar los más pequeños?)

14/6. Podemos hacer patente este proceso fácilmente, casi en forma perogrullesca, en el homeóstato (al cual consideramos ahora como un sistema entre cuyas variables se encuentra la "posición del uniselector", de forma que tiene muchos estados de equilibrio, que difieren unos de otros de acuerdo con la posición mencionada).

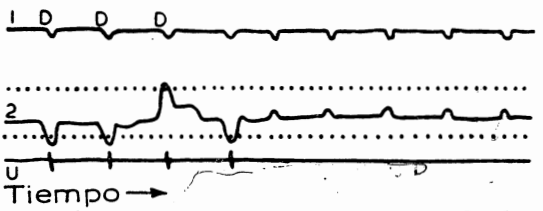


FIGURA 14/6/1. — Gráfica de un homeóstato. El operador desplaza el imán en 1 un ángulo fijo en cada punto *D*, y 2 recibe el efecto correspondiente a través de su uniselector; cuando el valor de éste hace que el imán de 2 llegue a un estado crítico (señalado con puntos), cambia dicho valor. Tras el cuarto cambio la posición de uniselector es tal que sólo se produce un pequeño movimiento de 2, y su valor se conserva permanentemente.

Podemos ver este proceso en la figura 14/6/1. Dos unidades estaban enlazadas en la forma $1 \rightarrow 2$; el efecto de la primera unidad sobre la segunda estaba determinado por el uniselector de 2, cuya posición cambiaba al llegar esta unidad a un estado crítico; el operador introducía reiteramente una perturbación en 2, para lo cual movía 1 en los puntos *D*; siempre que el uniselector transmitía un efecto considerable a 2, esta unidad cambiaba la posición de aquél, pero en cuanto llegó a colocarse en una posición tal que la transmisión no bastaba

para arrastrar a 2 a sus estados críticos, se conservó dicha posición. Así pues, bajo una estimulación constante en *D*, la amplitud de la respuesta de 2 pasó de mayor a más pequeña.

En la figura 14/6/2 se observa el mismo proceso en forma más compleja. Dos unidades se encuentran en interacción: $1 \Leftrightarrow 2$; ambos efectos pasan por los uniselectores, de modo que el conjunto es ultraestable; en cada punto *D* el operador desplazaba el imán de 1 una magnitud constante; al ser "estimulado" por primera vez, la respuesta

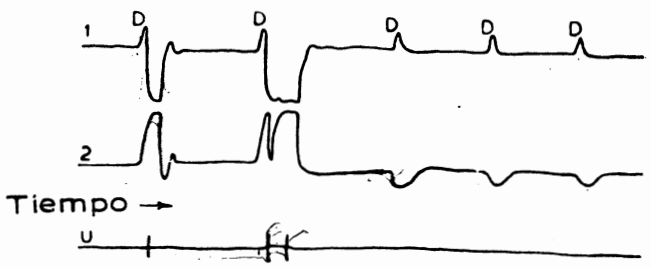


FIGURA 14/6/2. — Homeóstato dispuesto en sistema ultraestable con dos unidades en interacción. En cada *D* el operador mueve el imán de 1 un ángulo fijo; se conserva de modo permanente el primer campo tal que *D* no haga tropezar con un estado crítico.

de 2 hizo que el sistema alcanzara un estado crítico, lo cual llevó a la ultraestabilidad a encontrar un nuevo campo terminal; la segunda estimulación suscitó de nuevo análogo proceso, pero el nuevo campo era tal que el desplazamiento *D* ya no hizo que 2 llegase a un estado crítico, por lo cual se conservó. Una vez más, la respuesta disminuyó bajo estimulación constante.

14/7. Con gran frecuencia encontramos en el comportamiento animal el fenómeno de la "habituación": si se aplican a un animal estímulos reiterados, la respuesta suscitada tiende a disminuir. Algunos han considerado que este cambio constituye la forma más sencilla de aprender; para ello no hacen falta mecanismos neuronales, pues en los protozoos puede observarse con toda claridad:

> "Las *Amoebae* reaccionan negativamente al agua del grifo y a la procedente de un cultivo extraño, pero cuando se las ha pasado a tales medios se comportan normalmente."
>
> "Si se sumerge un *Paramecium* en una solución al 1/2 % de cloruro sódico muestra inmediatamente la reacción de aversión... Si el agente estimulador no es tan enérgico como para ser directamente destructivo, la reacción cesa al cabo del tiempo, y los *Paramecia* nadan por toda la solución igual que antes lo hacían en agua". (Jennings).

A veces se ha sugerido que la fatiga es la causa de este fenómeno, pero gracias a los experimentos de Humphrey se la ha podido excluir: este investigador trabajó con caracoles, y se valió del hecho de que cuando se le golpea el "pie" de un caracol, éste se retrae a su concha; mas cuando los golpecitos se repiten con breves intervalos, el animal llega a no reaccionar; el estudioso citado observó que si los golpes son leves, la habituación aparece antes, pero que si son muy fuertes se postpone indefinidamente; ahora bien, esto es lo contrario de lo que sería de esperar por efecto de la fatiga, pues ésta debería producirse más rápidamente cuando, debido a golpes más enérgicos, las retracciones son más vigorosas.

Se han propuesto diversas explicaciones especiales para dar cuenta de su origen, pero su casi universal distribución en los organismos vivos debería servirnos de advertencia de que tiene que basarse en algún factor mucho más extendido que el neurofisiológico. Los razonamientos de este capítulo hacen pensar que se trata de un fenómeno cuya aparición es de esperar en alguna medida en todos los sistemas poliestables cuando se los someta a un estímulo o una perturbación reiterados.

Las perturbaciones pequeñas

14/8. Podemos emplear exactamente el mismo tipo de razonamiento —la búsqueda de lo que pueda ser terminal— cuando *S* no sea un estímulo que se reitere con toda exactitud, sino que cada vez que se lo aplique constituya una muestra de un conjunto de perturbaciones que tengan una distribución determinada. En este caso, tanto las confluencias como los estados de equilibrio de la figura 14/3/1, por ejemplo, no sufrirían modificación alguna, pero las flechas que proceden de los estados de equilibrio perderían su unicidad y se convertirían en un haz o distribución de flechas, de las cuales se extraería una, mediante un proceso de muestreo, al presentarse cada perturbación.

El resultado es muy parecido: el punto representativo abandona pronto todo equilibrio cuyas flechas conduzcan lejos, a otras confluencias, mientras que el equilibrio todas cuyas flechas terminen en su propia confluencia lo atrapará. Así pues, el sistema poliestable pasa selectivamente (en caso de estar libre de ciclos) a los equilibrios inmunes a la acción de pequeñas perturbaciones irregulares.

14/9. Los campos (de las variables principales) elegidos por el sistema ultraestable se encuentran sometidos a este hecho. Consideremos,

en efecto, los tres campos de la figura 14/9/1, que podrían haber aparecido como campos terminales en la figura 7/23/1: en los titulados *A* y *C*, los puntos representativos, en ausencia de perturbaciones, irán a parar a estados de equilibrio y permanecerán en ellos; cuando se encuentren allí, es posible que un desplazamiento hacia la izquierda suficiente para que el punto representativo de *A* tropiece con un estado crítico no baste para ello en el caso de *C*, de modo que este último campo podría sobrevivir a ciertos desplazamientos que acabarían con *A*. Análogamente, es más probable que un desplazamiento aplicado al punto representativo situado en el ciclo de *B* dé lugar a

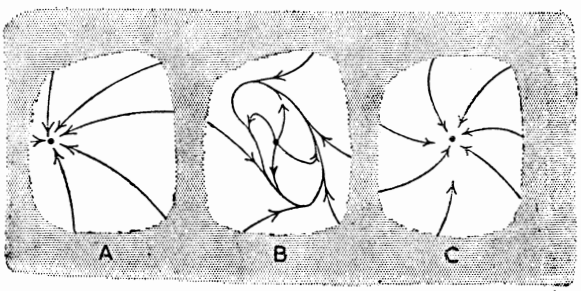


FIGURA 14/9/1. — Tres campos de un sistema ultraestable, de diversa facilidad para cambiar cuando se someta al sistema a pequeñas perturbaciones aleatorias. (La zona punteada representa los estados críticos.)

un cambio de campo que cuando se aplique al de *C*. Por consiguiente, este último campo, cuyo estado de equlibrio se encuentra próximo al centro de toda la zona [de equilibrio], tiende a poseer mayor inmunidad frente a los desplazamientos que los que tengan estados de equilibrio o ciclos cercanos al borde de dicha zona.

14/10. ¿Cómo se manifestaría esta tendencia en el comportamiento del organismo viviente?

Los procesos del apartado 7/23 permiten que un campo determinado sea terminal y que, sin embargo, presente toda clase de características peregrinas; ciclos, estados de equilibrio próximos a los bordes de la zona [de equilibrio], entremezclamiento de líneas estables e inestables, estados de equilibrio o ciclos múltiples, etc.; posibilidades que no dejaban ver la relación existente entre el que un campo sea terminal y que sea apropiado para mantener las variables esenciales dentro de límites normales. Pero no era necesario un estudio por-

menorizado, pues acabamos de observar que todos estos campos extraños tienden a quedar destruídos selectivamente cuando se somete al sistema a perturbaciones pequeñas, ocasionales y aleatorias; y como éstas son inseparables de la existencia práctica, el proceso de "endurecerse" tiende a hacer que los reemplacen campos que presenten el aspecto del *C* de la figura 14/9/1 (cuya actuación consiste simplemente en mantener el punto representativo bien lejos de los estados críticos).

La adaptación en sistemas iterados y seriados

15/1. Los tres últimos capítulos se han ocupado primariamente de técnica: de la lógica de los mecanismos cuando éstos se presentan parcial, fluctuante y temporalmente divididos en subsistemas; y han tomado en consideración especialmente el caso en que estos últimos tengan abundancia de estados de equilibrio. Ahora podemos recoger el cabo que dejamos suelto en el apartado 11/13 y ponernos a estudiar el problema de cómo puede adaptarse un organismo grande y complejo a un medio de iguales características sin invertir en ello el tiempo casi infinito que el apartado 11/5 nos había mostrado.

Los capítulos restantes proporcionarán testimonios de que los hechos son como sigue:

1) El medio terrestre ordinario posee una distribución de propiedades muy diferente de la que asumíamos cuando obtuvimos (en 11/2) una estimación tan elevada.

2) Frente a la distribución que realmente presentan estos medios, el proceso de la ultraestabilidad puede lograr con frecuencia la adaptación en un tiempo razonablemente breve.

3) Cuando un medio concreto se hace más complejo, el tiempo de adaptación se eleva, no solamente en los teoréticos sistemas ultraestables, sino asimismo en los sistemas vivos reales.

4) Cuando el medio es excesivamente complicado y entretejido, unos y otros sistemas fracasan igualmente.

En este capítulo y en el siguiente vamos a estudiar medios de complejidad progresivamente creciente (según avancemos quedará claro qué es lo que quiere decir "complejidad").

15/2. En el apartado 11/11 indicábamos que el homeóstato (esto es, las dos unidades, por ejemplo, a las que atribuyésemos la representación del "medio") no es típico del medio terrestre, porque en este aparato cada variable está enlazada directamente con cada una de las demás, de forma que cuanto acontezca a cada una de ellas está condicionado, en todo momento, por los valores que tengan *todas* las

restantes variables del sistema. Entonces, qué es lo que caracteriza a los medios terrestres ordinarios desde este punto de vista?

La observación corriente nos enseña que estos medios suelen presentar diversos rasgos que se encuentran en relación mutua muy estrecha:

1) Muchas de las variables (a menudo la mayoría de ellas) son *constantes* a lo largo de intervalos de tiempo considerables y se comportan, por tanto, como funciones parciales: así, el mamífero se apoya sobre el suelo, que casi siempre está inmóvil; los troncos de los árboles conservan sus posiciones; una taza colocada sobre una mesa permanecerá sobre ella hasta que se presente una fuerza de magnitud superior a una determinada; de modo que, al mirar en torno, uno observa que solamente en los lugares más caóticos cambiarán de valor todas las variables. Y, en virtud de 12/14, esta constancia, esta asiduidad de las funciones parciales, tiene que deberse a que los estados de equilibrio de las partes que compongan el medio terrestre son sumamente corrientes. Así pues, el medio de los organismos vivos tiende típicamente a constar de partes ricas en estados de equilibrio.

2) Ligado a esta constancia (como es muy natural, dado 12/17) se encuentra el hecho de que la mayoría de las variables del medio ejercen un efecto inmediato solamente sobre unas pocas del total de variables que haya. Por ejemplo, en el instante en que introduzco la pluma en el tintero apenas resulta afectada ninguna otra variable de la habitación; y es posible que al abrirse la puerta cambien las posiciones de unas cuantas cuartillas, pero ello no afectará a las sillas, a la luz eléctrica, a los libros que están en las estanterías ni a una multitud de otras variables.

En realidad, nos vemos conducidos de nuevo a considerar las propiedades de un sistema cuyas conexiones sean fluctuantes y condicionadas; es decir, el tipo que ya hemos encontrado en el apartado 11/12, y que, por tanto, podemos tratar valiéndonos del mismo método que allí. Por consiguiente, en mi opinión, la mayoría de los medios que los organismos vivos encuentran en esta tierra incluyen muchas funciones parciales; y, a la inversa, un sistema de funciones de este tipo representa de modo adecuado una clase enormemente amplia de medios que se presentan con gran asiduidad.

Como ejemplo confirmatorio veamos la descripción, por Jennings, de una hora de la vida de un paramecio (en la que señalaremos las funciones parciales conforme vayan apareciendo).

(Nada hacia arriba y) "... llega así a la película superficial".

Los efectos superficiales, por ser constantemente iguales a cero a todas las profundidades de la charca, tienen que variar como funciones parciales: una discontinuidad tal como una superficie puede engendrar funciones de esta índole de muchos modos distintos.

> "Ahora se produce un fuerte choque mecánico: acaso alguien lanza una piedra al agua."

Las modificaciones intermitentes de este tipo causarán cambios de valor de muchas variables en forma de funciones parciales.

> (El paramecio se sumerge) "... lo cual le hace llegar pronto a capas de agua con notable carencia de oxígeno".

El contenido de oxígeno varía en unas ocasiones como una función parcial y en otras como total, según sea el margen [de variación] que se considere; como Jennings no había mencionado antes tal contenido, es evidente que había supuesto su constancia.

> "... y se acerca a una zona en donde el sol ha estado calentando... el agua."

La temperatura del agua se comportará a veces como función parcial y a veces como función total.

> (Va de un lado para otro) "... hasta las proximidades de un tallo fresco recientemente aplastado; la savia de la planta, al rezumar, altera marcadamente la composición química del agua".

En otras partes la concentración (nula) de estas substancias es constante.

> "Otros paramecios... se golpean frecuentemente" (esto es, chocan entre sí).

La presión que sufre el extremo anterior del paramecio varía como una función parcial.

> "El animal puede golpearse contra las piedras."

Otras funciones parciales parecidas.

> "Nuestro animal toca una hoja pútrida y blanda."

Más funciones parciales.

> "... hasta que llega a una zona con más bióxido de carbono que el ordinario".

La concentración de este compuesto, que es, en general, uniforme, pero experimenta aumentos locales, variará en el espacio como una función parcial.

> "Arriba, por fin, a la fuente del bióxido de carbono: una gran masa de bacterias, embebida en zooglea."

Otra función parcial, debida al contacto.

Es patente que el mundo ecológico del *Paramecium* contiene muchas funciones parciales, y que lo mismo ocurre con los mundos de la mayoría de los organismos vivos.

Un medio total, o universo, que contenga muchas funciones parciales presentará cierta dispersión, ya que el conjunto de variables activas en un momento determinado será distinto, con frecuencia, del conjunto activo en otro; y, por consiguiente, la actividad *dentro del medio* tenderá, lo mismo que se indicaba en el apartado 13/18, a ser de tipo fluctuante y condicionado, más bien que invariante. Cuando un animal se encuentra en interacción con su medio, el observador podrá apreciar que la actividad de éste se confina ahora en este conjunto, luego en aquel otro; si hay algún conjunto que permanezca activo durante largo tiempo y si el resto se mantiene inactivo y desdibujado, el observador puede decir, si lo prefiere, que aquél es "el" medio; y si más tarde la actividad pasa a otro conjunto puede llamar a éste, si le place, un "segundo" medio; lo que hace que sea razonable este cambio de opinión es la presencia de funciones parciales y de dispersión.

Un organismo que trate de adaptarse a un medio que conste en gran medida de funciones de esta índole se encontrará con que tal medio está compuesto de subsistemas que en ocasiones son independientes, pero de que de vez en cuando están enlazados. Podemos ver claramente la alternancia entre una cosa y otra cuando alguien aprende a conducir. El principiante forcejea con distintos subsistemas: tiene que aprender a dominar el volante y las relaciones entre el automóvil, por un lado, y la calzada y el peatón, por otro; asimismo ha de aprender a manejar el acelerador y su relación con la velocidad del motor, para no embalar ni "calar" éste, y, por fin, a cambiar de marcha, de modo que ni queme el embrague ni haga que rasquen los engranajes. En una carretera despejada, llana y sin tráfico puede pasar por alto el acelerador y el cambio de velocidades, y dedicarse a manejar el volante como si los otros dos sistemas no existiesen; en la cabina de enseñanza puede aprender a cambiar como si no hubiera volante; pero en un

viaje normal las relaciones varían: durante gran parte del tiempo puede considerarse que los tres sistemas

conductor + volante + ...
conductor + acelerador + ...
conductor + palanca de cambio + ...

son independientes, cada uno de ellos completo en sí mismo; pero de vez en cuando entran en interacción. Pues no solamente dos cualesquiera de ellos pueden utilizar variables comunes del conductor (de brazos, piernas o cerebro), sino que la máquina y el mundo en torno los vinculan de algún modo: así, todo intento de cambiar de marcha involucra la posición del acelerador y la velocidad del vehículo, y para doblar una esquina en ángulo muy cerrado es preciso frenar y pasar a otra marcha previamente. De forma que el sistema total presenta la división temporal y condicionada en subsistemas que es típica de un todo compuesto en gran medida por funciones parciales.

Así pues, el medio terrestre encaja bastante dentro del tipo de los sistemas poliestables.

15/3. Para estudiar el modo de actuar de la ultraestabilidad cuando el medio no está completamente enlazado hemos de recurrir a la estrategia del apartado 2/17, y escoger ciertos casos como formas tipo. Por consiguiente, vamos a considerar medios con cuatro grados de conexión.

Primeramente (en 15/4-7) estudiaremos el "todo" en que las partes tengan un número de conexiones igual a cero — esto es, el caso límite cuando dicho número es cada vez más pequeño.

En los apartados 15/8-11 nos ocuparemos del caso en que existan conexiones, pero en que los subsistemas se hallen enlazados en cadena y sin realimentación entre ellos. Y con estos dos casos nos bastará para hacer patentes ciertas propiedades básicas.

En el próximo capítulo prestaremos atención a otro caso más realista: aquél en que los enlaces entre los subsistemas no estén limitados en cuanto a su dirección, de suerte que exista realimentación entre ellos. Y, a su vez, lo dividiremos en dos tipos: en los apartados 16/2-4 trataremos de los sistemas totales en los que haya gran abundancia de conexiones, y a partir de 16/5 nos ocuparemos del caso más interesante: en él las conexiones pueden tener cualquier dirección (con lo que existe realimentación entre los subsistemas), pero no son abundantes, de modo que podemos considerar que el conjunto está formado

por subsistemas cada uno de los cuales tiene unas conexiones internas sumamente abundantes, pero que están enlazadas entre sí mucho más escasamente — se trata del caso, en realidad, del sistema que ni posee gran riqueza de enlaces ni carece de ellos.

La adaptación en sistemas iterados

15/4. El primer caso que vamos a considerar es aquél en que el sistema total (de organismo y medio) está dividido en subsistemas que — al menos, durante el período de observación — no ejercen ninguna acción efectiva unos sobre otros; por tanto, en la figura 15/4/1 no nos

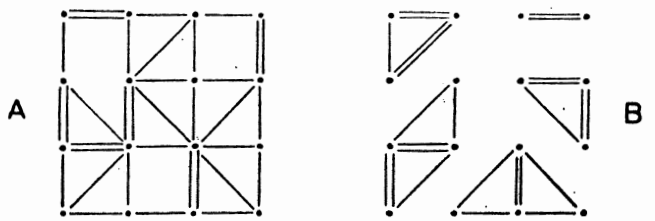


FIGURA 15/4/1.

fijaremos en *A*, sino en *B* (para simplificar, en estos diagramas se han subsituído las flechas por segmentos). Si el sistema total consiste, como hemos dicho, en el organismo y el medio, la división que realmente exista entre ellos podría ser la representada en la figura 15/4/2. Cual-

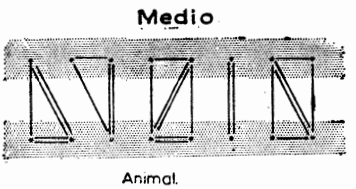


FIGURA 15/4/2. — Representación esquemática de un animal con ocho variables en interacción con su medio en forma de cinco sistemas independientes.

quier organismo que se enfrente con su medio ejercitando diversas reacciones independientes presentará funcionalmente una disposición análoga a la de esta figura; y diremos que un conjunto de este tipo consta de sistemas **iterados.**

En el apartado 13/10 tenemos un ejemplo del razonamiento aplicable a semejantes "todos": si i es el número de subsistemas que se

encuentren en estado de equilibrio en un instante concreto, en un conjunto iterado *i* no puede descender, y ordinariamente crecerá. Al ir llegando al equilibrio subsistema tras subsistema permanecerán en él, de manera que el todo se modificará acumulativamente, acercándose al equilibrio total.

15/5. Ahora carece de importancia el que las realimentaciones de la figura 15/4/2 sean de primer orden o de segundo (cf. 7/5): el conjunto total se mueve progresivamente hacia el equilibrio. Por consiguiente, si cada subsistema posee variables esenciales y mecanismos de escalón como los de la figura 7/5/1, se formará una estabilidad de segundo orden, lo mismo que decíamos en 7/23, y, por tanto, la *adaptación* del todo a su medio aumentará de forma acumulativa y progresiva.

En este caso, en cada subsistema se desarrollará el proceso de aprendizaje por ensayo y error independientemente de lo que ocurra en los demás. Y Parker ha mostrado, mediante el experimento que sigue, que en un solo y mismo animal puede encontrarse este aprendizaje independiente y localizado:

> "Si se alimenta a una anémona de mar por un lado de la boca, toma los trozos de alimento, uno tras otro, valiéndose de los tentáculos de ese lado. Si ahora se hacen alternar partículas alimenticias con trozos de papel de filtro empapados en jugo de carne, acepta indiscriminadamente ambos materiales durante unos ocho o diez ensayos, al cabo de los cuales sólo toma la carne, y suelta en el agua el papel de filtro, sin introducirlo en la boca. Pero si, tras de haberse llegado a esta situación en un lado de la boca, se traspasa el experimento al lado opuesto, se aceptan tanto el papel de filtro como la carne, hasta que este lado adquiera a su vez una discriminación."

15/6. ¿Qué ocurre con el tiempo que requiere el conjunto iterado para adaptarse? En este caso es aplicable T_3 (del apartado 11/5), de forma que no hay por qué temer la extremosidad de T_1. Así pues, por grande que sea el todo, si consta, en realidad, de diversos subsistemas iterados, el tiempo que tarde en adaptarse será, según es de esperar, del mismo orden de magnitud que el que necesita uno de sus subsistemas: en caso de que este tiempo sea muy corto, puede muy bien ocurrir que el conjunto total, aun siendo muy grande, logre adaptarse en plazo bastante reducido.

15/7. Si dibujamos de nuevo la figura 15/4/2 de modo que las relaciones que guarda con el sistema de la figura 7/5/1 queden representadas explícitamente, llegamos al resultado que puede verse en la figura

15/7/1 (en la que hemos reducido a tres el número de subsistemas en beneficio de la sencillez del esquema).

Es posible que al lector le sorprenda inmediatamente que se hayan representado las tres partes que reaccionan del organismo (por lo regular, del cerebro de éste) como si no tuvieran conexión alguna entre sí: ¿no constituye tal cosa un defecto fatal?

Trataremos de este asunto más o fondo en el apartado 17/2; ahora sólo podemos dar una respuesta parcial. Vamos a comparar los dos procesos de adaptación que se originarían: 1) con los dos subsistemas de la izquierda enteramente desconectados, como muestra el dibujo, y 2) cuando la parte que reacciona del sistema *A* ejerza un efecto inmediato sobre el subsistema *B*.

El primer caso no ofrece dificultad: cada subsistema es un pequeño sistema ultraestable, homólogo al del apartado 7/5/1, y cada uno llegaría a adaptarse del modo ordinario.

En cambio, cuando se establece un enlace con *B* de modo que éste resulte afectado por *A*, la totalidad del proceso cambia: *A* no sufre efecto alguno, de modo que se adaptará lo mismo que antes, pero *B*, que antes se encontraba aislado, queda ahora afectado por uno o más parámetros, que no tienen por qué permanecer constantes; y el efecto que se ejercerá sobre este subsistema dependerá de que dicho efecto proceda de la parte que reacciona o de los mecanismos de escalón (en uno y otro caso, de *A*). Si proviene de estos mecanismos, *B* no

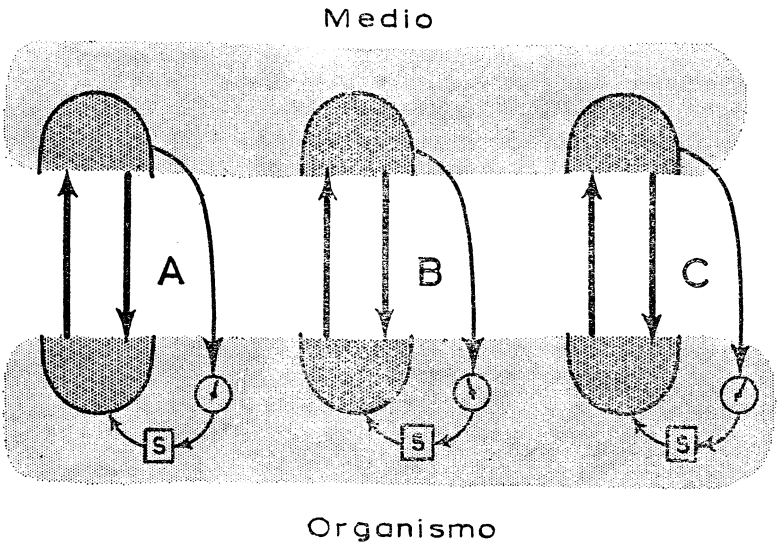


FIGURA 15/7/1. — Bosquejo del diagrama de efectos inmediatos de un organismo que se adapte a un medio actuando como tres subsistemas separados. (Confróntense las figuras 15/8/1 y 16/6/1.)

puede llegar a una adaptación permanente hasta que *A* se haya adaptado, pues mientras esto no ocurra los valores de aquéllos continuarán cambiando; mas una vez que hayan adoptado sus valores terminales, los parámetros de *B* serán constantes, y este subsistema podrá *entonces* comenzar fructuosamente su propia búsqueda, sin sufrir perturbaciones procedentes de cambios ulteriores. Así pues, el enlace con los mecanismos de escalón de *A* doblará aproximadamente el tiempo requerido para que el todo llegue a conseguir la adaptación.

Pero si el efecto que se ejerce sobre *B* proviene de la parte que reacciona de *A*, aun después de que este último subsistema se haya adaptado, la línea de comportamiento que esta parte siga cada vez que haga patente su adaptación (respondiendo del modo apropiado a toda perturbación que proceda de su medio) hará que varíe el conjunto de valores que constituya los parámetros de *B;* por consiguiente, *B* se encuentra en una situación análoga a la del homeóstato del apartado 8/10, salvo en cuanto a que aquel subsistema se encuentra sujeto a muchos más valores de los parámetros que dos; y el tiempo que necesitará *B* para llegar a adaptarse sometido a *todos* estos valores tenderá a parecerse a T_1 (véase 11/5) y, por tanto, a ser excesivamente largo. Así pues, si la parte que reacciona de *A* se enlaza con la de *B*, el efecto producido puede ser el de posponer casi indefinidamente la adaptación del todo.

Estas observaciones bastan por el momento, probablemente, para hacer ver que la ausencia de conexiones entre los subsistemas del organismo de la figura 15/7/1 no descalifica desde el principio esta representación; en estas cuestiones de los enlaces hay otras muchas cosas además de lo inmediatamente obvio. (Volveremos sobre estos puntos en el apartado 17/2.)

La adaptación en serie

15/8. De acuerdo con 15/3, encontramos el segundo grado de conexión del sistema cuando las partes del medio están unidas como en una cadena; y podemos ver en la figura 15/8/1 una representación de este caso.

Sin necesidad de que investiguemos ahora qué es lo que va a ocurrir exactamente, es evidente, por analogía con el apartado anterior, que la adaptación tiene que producirse en sucesión: primero *A*, luego *B* y por fin *C*. Estamos considerando el caso, pues, del organismo que se enfrente con un medio cuyas partes guarden entre sí tales relaciones que sólo sea posible adaptarse a él a través de un proceso *que respete su articulación natural.*

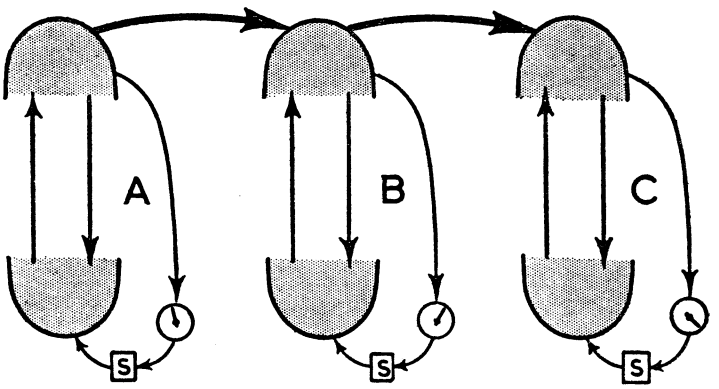


FIGURA 15/8/1.

15/9. Los medios de esta índole son muy corrientes. Así, el cachorro sólo puede aprender a cazar conejos tras haber aprendido a correr, pues el medio no permite que estas dos reacciones se aprendan en orden inverso. Y gran parte de las cosas que se aprenden tienen que seguir este camino: las matemáticas, por ejemplo, aun siendo excesivamente vastas e intrincadas para un relámpago de comprensión total, pueden dominarse por estadios, los cuales tienen una articulación natural que es preciso respetar para que pueda adquirirse un dominio en esta materia (de este modo, el estudiante puede seguir el orden "suma, multiplicación de números grandes...", pero no este otro: "multiplicación de números grandes, suma...); y, en realidad, se ha conseguido llegar a los conocimientos matemáticos actuales debido a que el asunto tiene semejantes vías, que pasan de una etapa a otra.

Como ilustración muy clara de tal proceso reproducimos lo que decía Lloyd Morgan sobre el adiestramiento del halcón.

> "Se le enseña con el señuelo — una paloma muerta —, primeramente estando sujeto con la lonja; luego se ata a ésta un bramante, un ayudante desencapirota el halcón y el halconero lo llama dando una grita y lanzando el señuelo; día tras día, en forma gradual, se aumenta la distancia, hasta que el gerifalte acuda a unos treinta metros sin vacilar; después se le puede permitir que vaya al señuelo libre de toda atadura, y, poco a poco, que lo haga desde cualquier distancia, hasta alrededor de mil metros, digamos. Una vez logrado esto, tiene que aprender a caer a la presa... lo cual debe hacerlo, primero, una sola vez, y luego, de un modo progresivo; hasta que caiga al señuelo y se retire de él cuantas veces se desee. A continuación hay que dejarle que pele..."

También se ha hecho ver este mismo proceso de un modo más formalizado. Wolfe y Cowles, por ejemplo, lograron enseñar a chimpancés a cambiar fichas por fruta; entonces, estos animales aprendían a abrir cajas de truco para conseguir fichas, pero aprendían este modo de apoderarse de fruta (la reacción "adaptativa") sólo si dominaban ya perfectamente el procedimiento de trueque de ésta por ficas; dicho, de otro modo, cuando el medio se presentaba como un todo complejo superaba su capacidad de adaptación (no eran capaces de conseguir la fruta), pero si lo tomaban en dos etapas en un orden determinado podían adaptarse a él.

Y Culler decía que "...al ir desarrollándose, el niño da forma día tras día y año tras año a una cadena compleja de conocimientos y destrezas adquiridos, y los añade uno detrás de otro en una sucesión sin fin". No necesito subrayar más la importancia de la adaptación en serie.

15/10. Con objeto de ver este proceso con mayor detalle, consideremos el siguiente ejemplo. Pensemos en un animal joven que haya aprendido a moverse por el mundo sin chocar con los objetos (aun cuando se trata de un aprendizaje complejo valdrá con propósitos ilustrativos, y presenta la ventaja de hacer el ejemplo más vívido). El proceso de aprendizaje correspondiente se habrá basado en la ultraestabilidad, que ha dado lugar a la existencia en los mecanismos de escalón de un conjunto de valores cuyo campo correspondiente sea tal que el sistema formado por los ojos, los receptores de la piel, algunas parte del cerebro y los objetos externos duros sea estable, y que, además, actúe siempre de modo tal que las presiones y esfuerzos mecánicos causados por los objetos en contacto con dichos receptores se mantengan dentro de ciertos límites (cf. 5/4). Por consiguiente, el diagrama de efectos

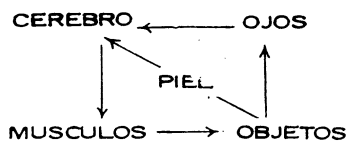


FIGURA 15/10/1. — Diagrama de efectos inmediatos del sistema "aversivo". (Cada palabra representa muchas variables.)

inmediatos se parecerá a la figura 15/10/1; y nos referiremos a este sistema con el nombre de parte *A*, o sistema "aversivo" [*lit.*, de evitación *o* de esquivamiento].

Como el animal tiene ahora que conseguir comida, en el cerebro debe

formársele un conjunto de valores de los mecanismos de escalón tal que en el campo correspondiente aparezcan como variables el cerebro y los alimentos, y que sea tal que la concentración de glucosa de la sangre se mantenga dentro de los límites normales (sistema al que llamaremos parte *B*, o sistema "de nutrición"). Esta adquisición se deberá también a la ultraestabilidad, pero mientras ello ocurra los dos sistemas entrarán en interacción.

Tiene que producirse una interacción porque mientras el animal efectúe las tentativas (por "ensayo y error") de procurarse alimento encontrará repetidamente objetos con los que podría chocar — un caso muy claro es el de un perro persiguiendo a un conejo por el monte alto —; y, además, existe la posibilidad de que los procesos de dispersión que tengan lugar dentro del cerebro y del medio permitan que dos reacciones empleen variables comunes. Cuando los dos sistemas se hallen en interacción, el diagrama de efectos inmediatos se parecerá a la figura 15/10/2.

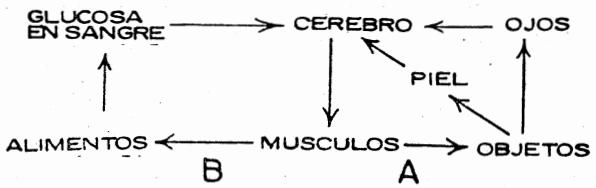


FIGURA 15/10/2.

Al llegar a este punto supongamos (simplemente para llegar a un caso susceptible de estudio claro) que los mecanismos de escalón que afecten a *A* no puedan cambiar, por la razón que sea, mientras esté en curso la adaptación a *B* (compárese con el apartado 10/8). Como el sistema "aversivo", *A*, no está sometido a ningún cambio de las funciones escalonadas, su campo no se alterará, y reaccionará en todo momento de acuerdo con su modo característico de hacerlo; así pues, el sistema total equivale a un sistema ultraestable, *B*, en interacción con un "medio", *A*; y equivaldrá, asimismo, a un sistema ultraestable en interacción con un reflejo innato, como ocurría en el apartado 3/12. Por consiguiente, los valores de los mecanismos de escalón de *B* cambiarán hasta que el conjunto tenga un campo estable que mantenga dentro de ciertos límites la variable (concentración de glucosa) cuyas desviaciones de importancia harían cambiar los mecanismos de escalón. Sabemos, por el apartado 8/11, que, cualesquiera que sean las peculiaridades de *A*, el campo terminal de *B* estará adaptado *a ellas*.

Conviene darse cuenta de que los siete conjuntos de variables (figura 15/10/2) están agrupados de modo muy distinto cuando se los mira anatómicamente y cuando se los considera funcionalmente: el primer punto de vista distingue cinco conjuntos en el cuerpo del animal y dos en el mundo exterior; y el segundo ve el total compuesto de dos partes: una, que "se adapta", *B*, y otra, *A*, que constituye el "medio" para la primera.

Ahora podemos predecir cómo se comportará el sistema después de que hayan ocurrido los procesos anteriores. Como la parte *A* o sistema "aversivo" no cambia, el comportamiento del todo seguirá siendo tal que no se produzcan colisiones, y las reacciones a los alimentos mantendrán la concentración de glucosa en sangre dentro de sus límites normales; pero, además, como *B* se ha adaptado a *A*, el modo de conseguir alimentos se modificará de tal suerte que no entrañe encontronazos, ya que todas estas variaciones tienen que haber sido eliminadas.

15/11. ¿Qué ocurrirá con el tiempo necesario para la adaptación de todas las variables esenciales cuando el medio se encuentre enlazado así, esto es, en cadena?

El subsistema dominante, *A*, procederá a adaptarse, desde luego, del modo corriente; en cambio, *B* puede experimentar perturbaciones de cierto grado procedentes de *A* aun después de que este último subsistema esté adaptado, pues tales cambios provendrán, en último término, de las que experimente *A* (a las cuales este subsistema se tendrá que adaptar). También *C* puede sufrir alteraciones provinentes de algunas de las perturbaciones dichas, transmitidas a través de *B*, y así sucesivamente. Así pues, es probable que cada subsistema de la cadena sufra perturbaciones procedentes de todas las que lleguen a los subsistemas que lo dominen, y también otras procedentes de los cambios reactivos, adaptativos, efectuados por estos mismos subsistemas dominadores.

Ahora está clara la importancia de la capacidad (como canal) de los conexiones que transmitan las perturbaciones a lo largo de la cadena: si es elevada, puede transmitirse un volumen tal de perturbaciones a los miembros inferiores de la cadena que su adaptación puede resultar pospuesta indefinidamente; y si es pequeña, la atenuación puede ser tan rápida que *C*, aun estando afectado por *B*, sea prácticamente independiente de lo que ocurra en *A*, que un subsistema ulterior, *D*, no dependa prácticamente de lo que suceda en *B*, etc. Así pues, al debilitarse las conexiones entre los subsistemas, la adaptación tiende a ser

sucesiva: primero, *A;* después, *B;* luego, C, etc. (el límite lo constituye, naturalmente, el mismo del conjunto iterado).

Si la adaptación es sucesiva, el comportamiento corresponde al del caso 2 (del apartado 11/5); de modo que el tiempo de adaptación será el moderado T_2, en vez del excesivamente largo T_1. Por tanto, incluso con un organismo grande frente a un medio también grande, puede conseguirse la adaptación en un plazo moderado si el medio consta de subsistemas en cadena unidos mediante canales de escasa capacidad.

La adaptación en el sistema multiestable

16/1. Continuando nuestro estudio de los tipos de medios, vamos a considerar, tras haber estudiado las figuras 15/7/1 y 15/8/1, el caso en que los subsistemas del medio no sufran limitación alguna en cuanto a la dirección de las conexiones existentes entre ellos, de forma que sea posible la aparición de realimentaciones. Este tipo puede variar de acuerdo con el *volumen* de comunicación (la variedad de ésta) que se transmita de un subsistema a otro, y a este respecto tienen interés especial los dos grados siguientes:

1) aquél en que dicho volumen se encuentra cercano al máximo posible, o sea, el medio abundantemente enlazado (es conveniente comenzar la exposición por este caso, ya que cabe dar cuenta de él rápidamente), y
2) aquél en que tal volumen es pequeño.

El medio abundantemente enlazado

16/2. Cuando un conjunto de subsistemas se encuentra en estas condiciones, cada variable está tan afectada por las variables de otros subsistemas como por las del suyo propio; y cuando tal cosa ocurre, la división del todo en subsistemas deja de tener un fundamento natural.

Por tanto, este caso nos hace volver al tratado en el capítulo XI.

16/3. No son muy corrientes los ejemplos de medios que a la vez sean muy grandes y tengan gran riqueza de conexiones, ya que nuestro medio terrestre se caracteriza, en general, por estar muy subdividido (cf. 15/2); y, por consiguiente, percibimos intuitivamente cualquier medio abundamentemente enlazado como algo desusado, o incluso no natural. Los ejemplos que presentamos a continuación son un poco

rebuscados, pero bastarán para poner en claro qué es lo que podemos esperar en este caso.

Ya hemos mencionado la cerradura de combinaciones en el apartado 11/9; sus partes, aun cuando no son dinámicamente vigorosas, se encuentran conectadas entre sí (en lo que respecta a los posibles movimientos del cerrojo) de modo tal que las relaciones entre ellas estén sumamente condicionadas: así, si hay siete discos combinadores que permiten que el cerrojo se mueva cuando se coloquen en LOSANGE, el efecto producido en la posibilidad de moverse el cerrojo por la colocación del primer disco en *L* está condicionado a las posiciones que tengan los otros seis; y lo mismo ocurre con la segunda letra, y con todas las restantes.

Un conjunto de ecuaciones simultáneas, o sistema de ecuaciones, constituye un segundo ejemplo; y se trata de algo que cabe legítimamente considerar como medio temporal de un calculista profesional (en caso de que se le contrate simplemente para que dé soluciones correctas). Hay veces en que aparecen del modo más sencillo posible, por ejemplo:

$$\left.\begin{aligned} 2x &= 8 \\ 3y &= -7 \\ \tfrac{1}{2}z &= 3 \end{aligned}\right\}$$

y entonces corresponden a la forma iterada — se puede operar en cada línea prescindiendo de toda referencia a las demás, como ocurría en 15/4.

Hay ocasiones en que presentan mayor complejidad, v. gr.

$$\left.\begin{aligned} 2x &= 3 \\ 3x - 2y &= 2 \\ x + y - z &= 0 \end{aligned}\right\}$$

Esta forma se puede resolver en serie, como hacíamos en el apartado 15/8; pues nos podemos ocupar de la primera línea independientemente de las otras dos, luego (tras haber logrado lo que buscábamos en el primer proceso) podemos atacar la segunda prescindiendo enteramente de lo que sigue, y así hasta el final. La peculiaridad que presenta esta disposición es que el valor de *x no está condicionado* por los valores de los coeficientes de la segunda y tercera líneas.

Hay ocasiones en que se tienen formas más complicadas, tales como:

$$\left.\begin{aligned} 2x + y - 3z &= 2 \\ x - y + 2z &= 0 \\ -x - 3y + z &= 1 \end{aligned}\right\}$$

Ahora el valor de x está condicionado por los de *todos* los coeficientes, de modo que para hallarlo no podemos pasar por alto ninguno de éstos; y lo mismo ocurre con y y z. Así pues, si consideramos los coeficientes como medio y los valores de x, y y z como salida, para que la respuesta sea correcta es preciso que se tenga en cuenta *todo* el medio para obtener una parte cualquiera de la respuesta (esto es, uno cualquiera de los tres valores).

En los primeros tiempos del osciloscopio de rayos catódicos (ahora, a Dios gracias, ya no ocurre tal cosa) el experimentador se enfrentaba con un tercer ejemplo, y más práctico, de un medio abundantemente conectado. El ajuste de los primeros modelos experimentales era asunto de una complejidad considerable: cualquier intento de aumentar el brillo del punto luminoso podía hacer que éste desapareciese de la pantalla; al pretender que volviese era fácil alterar el ritmo de barrido y que empezase a oscilar verticalmente; cuando se intentaba corregir este defecto podía muy bien ocurrir que la línea de barrido dejase de ser horizontal, etc. Las variables del sistema (brillo del punto luminoso, ritmo de barrido, etc.), estaban vinculadas dinámicamente en forma muy abundante y complicada; y lo que hacía tan difícil regularlas por medio de los parámetros de que se disponía era precisamente la abundancia de los enlaces entre ellas.

16/4. ¿Cuánto tiempo tardará un sistema ultraestable que incluya un medio de esta índole en llegar a adaptarse?

Esta es la pregunta del apartado 11/2. A menos que sea aceptable una proporción muy elevada de las salidas del sistema, el tiempo que se necesite tenderá a ser como el T_1 del apartado 11/5; y al aumentar el tamaño del sistema, el tiempo de adaptación empezará a aumentar más allá de todos los límites prácticos; o, dicho de otro modo: el sistema ultraestable probablemente fracasará. Pero este fracaso no desacredita tal sistema como modelo del cerebro (cf. 8/17), ya que los medios de este tipo son también muy capaces de derrotar al cerebro vivo: tal es precisamente la razón por la que se confía en la protección ofrecida por la cerradura de combinaciones —esto es, que el organismo vivo está notoriamente sujeto a que le resulte difícil o imposible adaptarse a medios de tal naturaleza.

Incluso cuando un ladrón experto logra dominar la cerradura de combinaciones más bien confirma nuestra tesis que la refuta: pues si puede oír cómo cae en la posición debida cada fiador al ir moviendo uno tras otro los discos combinadores, este medio es para él uno seriado (véase 15/8), ya que le es posible colocar en la posición debida

el primer disco sin referencia a los demás, luego el segundo, y así sucesivamente; y de este modo hace muchísimo más pequeño el tiempo necesario para abrirla. Así pues, el ladrón experto, en realidad, no se adapta con éxito a un medio abundantemente enlazado, sino que hace patente que lo que para otros tiene gran riqueza de enlaces para él está enlazado en serie.

Por consiguiente, la primera respuesta a la pregunta acerca de cómo se adapta el sistema ultraestable —y lo mismo el cerebro— a un medio abundantemente enlazado, consiste en decir que no lo hace. Una vez que hemos puesto en claro que esta respuesta es perfectamente razonable, podemos advertir que hay ocasiones en que cabe adaptarse, en último término, a un medio que aparentemente tenga demasiada complejidad para permitir la adaptación: acaso descubriendo algún modo de realizar los ensayos necesarios mucho más deprisa, o gracias a averiguar que el medio no era tan complejo como parecía (en *I. to C.* se trata de esta cuestión).

El medio escasamente enlazado

16/5. Vamos finalmente a considerar el caso en que el medio conste de subsistemas enlazados de tal modo que se afecten unos a otros sólo de un modo muy leve, ocasionalmente, o únicamente a través de otros subsistemas. (En el apartado 15/2 hemos indicado que este es el caso corriente en casi todos los medios terrestres naturales).

Si el grado de interacción entre los subsistemas varía, sus límites son: por el extremo inferior, los sistemas iterados del apartado 15/4 (a los que se llega cuando la comunicación entre subsistemas desciende a cero), y por el superior, los abundantemente enlazados de 16/2 (al subir al máximo la comunicación).

Cuando la comunicación *entre* subsistemas es mucho menor que la existente *dentro* de cada uno de ellos, éstos aparecen a la vista de modo natural y destacado (cf. 12/17).

¿Qué ocurrirá si un medio de este tipo actúa dentro de un sistema ultraestable? ¿Se producirá adaptación? Como veremos al tratar estas cuestiones, el número de casos posibles es tan grande y sus formas son tan variadas que no cabe llegar a una exposición detallada y exhaustiva; por consiguiente, hemos de emplear la estrategia del apartado 2/17: ponernos completamente en claro acerca de ciertas formas tipo y abarcar las restantes apelando de algún modo a la continuidad (o sea, a que las demás formas tendrán un comportamiento parecido al

de aquellas otras en la misma medida en que se parezcan a ellas en su constitución).

16/6. Con objeto de llegar a una base segura para tratar de este caso, de máxima importancia, enunciamos explícitamente lo que vamos a asumir:

1) Suponemos que el medio es como el descrito en el apartado 15/2, esto es, que consiste en un gran número de subsistemas que tienen muchos estados de equilibrios: así pues, asumimos la presencia de un medio poliestable.

2) Ya sea porque los enlaces primarios entre subsistemas sean escasos, o porque los estados de equilibrio de ellos mismos sean muy corrientes, suponemos que la interacción entre subsistemas es muy débil.

3) El organismo acoplado a este medio se ha de adaptar a él por el básico proceso de la ultraestabilidad, es decir, adquiriendo realimentaciones de segundo orden que veten todos los estados de equilibrio excepto los que permitan que cada variable esencial se mantenga dentro de sus propios límites.

4) La parte que reacciona del organismo estará dividida en subsistemas que carezcan de conexión unos con otros: suponemos que cada subsistema posee sus propias variables esenciales y su realimentación de segundo orden. En la figura 16/6/1 se representan las conexiones de que hablamos, si bien de modo algo inadecuado, ya que

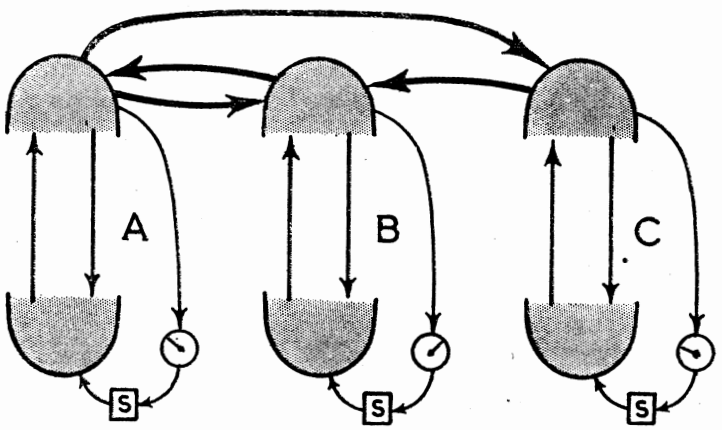


FIGURA 16/6/1.

sólo muestra tres subsistemas (compáresela con las figuras 15/7/1 y 15/8/1).

Un sistema de este tipo es análogo, en lo esencial, al sistema **multiestable** que definíamos en la primera edición de este libro (aunque aquél concedía más libertad a las conexiones entre las variables principales, es decir, entre las distintas partes que reaccionan, y entre cada una de éstas y cualquier subsistema del medio distinto de aquél a que se encontrase unida más directamente; estas diferencias son un estorbo, y, además, tienen muy poca importancia; por lo demás, las tomaremos en consideración en el próximo capítulo).

16/7. Para averiguar cuál será el comportamiento del sistema multiestable, supongamos que estemos observando dos de tales subsistemas (por ejemplo, los *A* y *B* de la figura 16/6/1), que sus variables principales estén ligadas entre sí directamente, de modo que los cambios que se produzcan en una afecten inmediatamente a la otra, y que por alguna razón los demás subsistemas se encuentren inactivos.

Lo primero de que conviene darse cuenta es de que tal inactividad quiere decir que podemos pasar por alto la presencia de estos últimos, pues se convierten, en virtud de ella, en algo parecido al "trasfondo" de que hablábamos en 6/1; e incluso aunque algunos de ellos estén en actividad, podemos dejarlos de lado en nuestras consideraciones si los dos subsistemas que estamos observando se encuentran separados de ellos por un muro de subsistemas inactivos (cf. 12/10).

Es preciso percatarse, además, de que nuestros dos subsistemas, cuando los miramos como una unidad, *forman un todo ultraestable*: éste avanzará, pues, a través de la serie ordinaria de acontecimientos, hacia un campo terminal, cuyo comportamiento no diferirá esencialmente del registrado en la figura 8/4/1. Pero si, en cambio, miramos esta misma sucesión de acontecimientos no como algo que ocurre dentro de un sistema ultraestable, sino como interacciones entre un medio más pequeño y un organismo más pequeño (cada uno de los cuales será un subsistema), veremos que tienen comportamientos homólogos a los observados cuando la interacción se producía entre el "organismo" y el "medio": dicho de otro modo, *en el interior de un sistema multiestable, los subsistemas se adaptan unos a otros exactamente de igual modo que el animal se adapta a su medio.* Se verá que se emplea el método de ensayo y error, y, una vez que el proceso haya terminado, las actividades de ambas partes resultarán estar coordi-

nadas entre sí con vistas al fin común de mantener las variables esenciales del sistema doble dentro de sus límites propios.

Exactamente el mismo principio rige las interacciones entre tres subsistemas: si se encuentran en interacción continua, forman un sistema ultraestable que poseerá las propiedades usuales de éste.

Puede ser ilustrativo a este respecto el interesante caso en el que dos de ellos (*A* y *C*, digamos), aun no teniendo conexión inmediata alguna entre sí, se encuentren enlazados a un sistema mediador, *B*, si bien intermitentemente, y no en forma continua. Supongamos que este último sistema entre primero en interacción con *A*: debido a su ultraestabilidad, llegarán a un campo terminal. Si ahora se produce la interacción entre *B* y *C*, pueden ocurrir dos cosas: si los mecanismos de escalón de *B* dan lugar, juntamente con los de *C*, a un campo estable para las variables principales de ambos sistemas, el conjunto de valores de tales mecanismos de *B* persistirá indefinidamente, ya que cuando este sistema vuelva a quedar enlazado con *A* se formará de nuevo el campo estable inicial; pero si aquellos dos conjuntos de mecanismos de escalón no proporcionan estabilidad, se producirá un cambio, que llevará a *B* a poseer un conjunto diferente; y de ello se sigue que los mecanismos de escalón de *B* cesarán de variar cuando (y sólo cuando) tengan un conjunto de valores que dé lugar a un campo estable tanto con *A* como con *C*. (Nótese la identidad de principio con el proceso descrito en el parágrafo 8/10).

16/8. Podemos ejemplificar este proceso con el homeóstato. Para hacerlo se conectaron tres unidades entre sí de modo que el diagrama de efectos inmediatos fuese $2 \Leftrightarrow 1 \Leftrightarrow 3$ (en correspondencia con *A*, *B* y *C*, respectivamente), y, con el fin de separar los efectos de 2 y 3 sobre 1, se colocaron unas barras que atravesaban los canalones de los potenciómetros [de agua] (figura 8/2/2)) de aquellas dos unidades, de forma que éstos sólo pudieran moverse en la dirección que en la figura 16/8/1 queda registrada hacia abajo (en tanto que 1 podía desplazarse lo mismo hacia arriba que hacia abajo): entonces, cuando 1 se encontraba por encima de la línea central (marcada de puntos en la figura), esta unidad entraba en interacción con 2, y 3 era independiente, pero cuando se hallaba por debajo, 1 y 3 actuaban uno sobre otro y 2 era independiente; esto es, 1 se había ajustado de tal modo que actuaba negativamente sobre 2 y positivamente sobre 3. (En cambio, los efectos $2 \rightarrow 1$ y $3 \rightarrow 1$ estaban regulados por el uniselector).

Al conectar el aparato, en *J*, 1 y 2 formaron un sistema inestable, y se llegó a un estado crítico; tras el cambio del uniselector (es decir,

en la zona *K*) 1 y 2 llegaron a la estabilidad, pero 1 y 3 formaron un sistema inestable; esto llevó a la posición siguiente (*L*), en la que 1 y 3 eran estables, pero en que 1 y 2 eran de nuevo inestables; en la posición siguiente (*M*) no se consiguió remediar la situación, pero la que siguió a ésta (o sea, la *N*) resultó proporcionar unas conexiones con las cuales ambos sistemas se convirtieron en estables. A partir

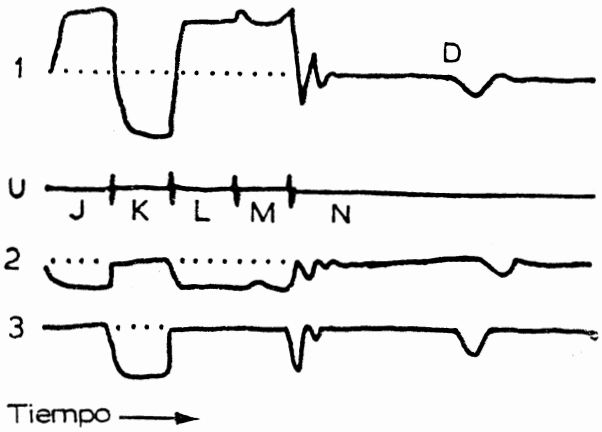


FIGURA 16/8/1. — Tres unidades del homeóstato en interacción. Unas barras colocadas en las posiciones centrales impiden que 2 y 3 se desplacen en la dirección que corresponde al trazo hacia arriba en esta gráfica. Los trazos verticales de *U* registran cambios de posición del uniselector de la unidad 1. La parturbación *D*, debida a la actuación del operador, hace patente la estabilidad del todo.

de tal momento los valores de los mecanismos de escalón son permanentes: 1 puede entrar en interacción repetidamente con 2 o con 3 sin pérdida de la estabilidad.

Habíamos advertido ya que si *A*, *B* y *C* han de formar de vez en cuando una combinación triple, los mecanismos de escalón de estas tres partes dejarán de cambiar cuando, y sólo cuando, dicha combinación tenga un campo estable. Pero podemos ir más allá: si *A*, *B* y *C* han de enlazarse intermitentemente de varias formas, en ocasiones por parejas, otras como una terna y aún otras permaneciendo independientes, sus mecanismos de escalón no cambiarán más cuando, y sólo cuando, lleguen a un conjunto de valores tal que *todas* estas disposiciones posean estabilidad.

Es claro que la misma argumentación puede aplicarse cualquiera que sea el número de subsistemas que se encuentren en interacción y cualesquiera que sean los grupos o configuraciones en que se enlacen: siempre podemos predecir que *sus mecanismos de escalón dejarán de*

cambiar cuando, y sólo cuando, todas las combinaciones sean estables. Los sistemas ultraestables, pues, ya estén aislados o unidos en sistemas multiestables, actúan siempre selectivamente con respecto a los valores de los mecanismos de escalón que proporcionen la estabilidad.

16/9. Al comienzo del apartado anterior supusimos, por razones de sencillez, que se suspendía el proceso de dispersión, ya que suponíamos que los dos sistemas en interacción permanecían los mismos (esto es, los *A* y *B* de la figura 16/6/1) a lo largo de todo el proceso. ¿Qué modificaciones han de hacerse cuando tengamos en cuenta el hecho de que en un sistema multiestable el número y distribución de los subsistemas activos en cada momento puede fluctuar debido a la dispersión?

Haya dispersión o no, se avanzará hacia el equilibrio del todo, hacia un campo terminal y, por tanto, hacia la adaptación de la totalidad. En cuanto al efecto que produce la dispersión, consiste en destruir la indivisibilidad de los subsistemas considerados en el apartado anterior: allí pintábamos dos subsistemas que atravesaban los complejos procesos de la ultraestabilidad de modo que sus variables principales fuesen activas una y otra vez, mientras que las de los subsistemas circundantes permanecían inactivas; pero difícilmente puede conservarse esta individualidad cuando se produce dispersión. Supongamos, en efecto, que el campo de todas las variables principales de un sistema multiestable sea estable, y que su punto representativo se encuentre en el estado de equilibrio *R*; si ahora se desplaza este punto a otra posición, *P*, las líneas de comportamiento que pasen por éste llevarán de nuevo a *R*, y al retroceder el sistema de aquel punto a éste entrarán en acción diversos subsistemas, acaso aisladamente, acaso combinados, pasando de activos a inactivos en forma y variedad caleidoscópicas y, aparentemente, de modo confuso; en caso de que volviese a *R* siguiendo otra línea se activarían asimismo diversas combinaciones de subsistemas, y de este modo se llegaría a un conjunto activo que podría ser muy distinto del correspondiente a la línea anterior.

En tales condiciones no tiene ninguna ventaja que observemos unos subsistemas concretos mientras el sistema multiestable esté en proceso de adaptación. Lo que ocurrirá es que, mientras haya algunas variables esenciales que se hallen fuera de sus límites, los cambios que se produzcan en los mecanismos de escalón harán entrar en actividad combinación tras combinación de subsistemas; pero cuando surja un campo estable, que no hará cambiar ninguno de estos mecanismos,

dicho campo se conservará, como es normal. Si ahora se somete a prueba la adaptación del sistema multiestable desplazando su punto representativo, veremos que responde con actividades diversas de varios subsistemas, todas ellas coordinadas con vistas al fin común; pero, pese a esta coordinación, en general no habrá ninguna relación sencilla entre las acciones de unos subsistemas sobre otros: el saber qué subsistemas se hayan activado en una línea de comportamiento, y cómo se produjera la interacción entre ellos, no dará certeza alguna acerca de cuáles se activarán a lo largo de otra línea determinada, ni de cómo habrán de entrar en interacción.

Más adelante me referiré de nuevo al caso de que "el subsistema *A* se adapte al *B*, o entre en interacción con él"; pero se tratará tan sólo de un modo de hablar que facilita la descripción: debe entenderse que tanto lo que sea *A* como lo que sea *B* pueden cambiar entre un instante y otro.

16/10. Esta nueva imagen que hemos presentado responde a la objeción que se plantea a la figura 16/6/1 (y a otras) de que presenta un orden y una nitidez no visibles por parte alguna cuando se examina anatómica o histológicamente el organismo (o el medio). Nuestras figuras son diagramas de efectos inmediatos, y lo único que pretenden es ayudar a una reflexión más fácil acerca de relaciones funcionales y de comportamiento: hay que ver en ellas solamente conexiones *funcionales,* y, de éstas, sólo aquéllas que sean activas durante algún pequeño intervalo temporal. Así pues, la figura 16/6/1 puede desorientar fácilmente en la medida en que sugiera una permanencia estructural que no existe cuando se produce dispersión, y asimismo porque hace pensar en una forma bidimensional real que puede muy bien carecer de existencia anatómica e histológica; sin embargo, las relaciones funcionales son indiscutibles, y esta figura las representa. (En cuanto a sus relaciones con las variables físicamente identificables en el cerebro, es algo que está todavía por descubrir.)

16/11. Aun cuando puede parecer que el sistema multiestable actúa de modo caótico, ya que su actividad fluctúa de unos sistemas a otros con la misma falta aparente de orden que habíamos visto en las chimeneas que "no tiraban" del apartado 13/18, su tendencia es siempre hacia un equilibrio y una adaptación últimos. Por ello, hemos de preguntar ahora lo mismo que habíamos preguntado en el capítulo XI: ¿invertirá la adaptación un tiempo excesivamente largo?

Es evidente, si tenemos en cuenta los razonamientos del capítulo

anterior, que mucho ha de depender de la abundancia de conexiones entre los subsistemas — es decir, del volumen de perturbaciones que cada subsistema reciba de los demás.

En el límite, cuando la transferencias de perturbaciones sea nula, el sistema total se hará idéntico a los de tipo iterado que hemos visto en el apartado 15/6, y el conjunto total se acercará a la adaptación de modo parecido a como sucedía allí; en este caso el tiempo requerido para adaptarse será el moderado T_3, y no el excesivo T_1.

Al ir aumentando la abundancia de conexiones, ya sea por haber más enlaces básicos o porque los subsistemas tengan menos estados de equilibrio, el sistema se desplazará hacia el tipo rico en conexiones del apartado 16/4, con lo cual el tiempo requerido para la adaptación aumentará, acercándose a T_1.

Resumen. Ahora estamos en situación de resumir la respuesta que hemos dado en los capítulos anteriores a la objeción planteada en el apartado 11/2: a saber, la de que la ultraestabilidad no puede ser el modo de adaptación empleado por los organismos vivos, ya que exigiría demasiado tiempo. Ya nos podemos percatar de que esta objeción se apoyaba, sin darse cuenta, en el supuesto de que tanto el organismo como el medio estén abundantemente enlazados, interiormente y uno con otro. Ahora bien, en el apartado 14/2 hemos presentado varios testimonios de que la abundancia *real* no es, en modo alguno, elevada; y los capítulos XV y XVI han hecho ver que cuando no es grande, la adaptación gracias a la ultraestabilidad puede producirse en un plazo que ya no es imposiblemente largo. Así pues, hemos contestado a tal objeción, al menos a grandes rasgos.

Tenemos que dejar la cuestión en este punto, pues un examen más circunstanciado dependería de medidas efectuadas en cerebros reales en pleno proceso de adaptación a sus medios reales y efectivos. (Lo cual no excede, acaso, las posibilidades del experimentador de hoy.)

La inhibición retroactiva

16/12. Lo que en este momento sugerimos al lector es que cuando se mira al sistema de la figura 7/5/1 desde cerca, en las formas en que aparece en los organismos y medios reales, se observa que se divide en partes bastantes parecidas a las de la figura 16/6/1 (o sea, las del sistema multiestable). Esbocemos algunas propiedades de este sistema — además de las que posee por ser básicamente ultraestable y constituir solamente una forma particular de la figura 7/5/1 — y veamos si están de acuerdo con lo que sabemos del organismo vivo.

La primera pregunta que hay que suscitar acerca del sistema multiestable es la de si es capaz de sacar partido de las situaciones recurrentes (cuestión de que ya habíamos tratado antes, en el capítulo X): una vez que un sistema de este tipo se haya adaptado a que un parámetro tenga el valor P_2, y luego a que posea el P_8, cuando se le presente otra vez con el P_2 ¿conservará su adaptación anterior?

Antes de intentar la respuesta, recordemos que en cualquier sistema poliestable dos líneas de comportamiento cualesquiera distintas producen cambios en dos conjuntos de variables (cf. 13/14), que pueden estar imbricados o no: cada uno de estos dos conjuntos se encontrará distribuído por el sistema algo así como las chimeneas que "no tiraban" se hallaban distribuídas sobre la ciudad (en el ejemplo del apartado 13/18); esto es, dos perturbaciones — P_1 *y* P_2 — que actúen sobre un sistema poliestable darán lugar a dos conjuntos de variables activas, de igual modo que dos vientos distintos — V_1 y V_2 — que soplen sobre una ciudad darán origen a dos conjuntos de chimeneas que "no tiren".

De todas las chimeneas de la ciudad, ¿qué parte no tirará con ninguno de los dos vientos? La respuesta exacta depende de unas condiciones exactas, pero como primera aproximación podemos ver (como hacíamos en 13/15) que si con V_1 no tira una pequeña proporción de chimeneas y con V_2 ocurre igual, asimismo con una pequeña proporción, y si, además, estas dos cantidades son independientes, la proporción de las chimenas que no tiren con ninguno de los dos vientos será el producto de aquellas dos proporciones, y, por tanto, mucho más pequeña que cualquiera de ambas. Así, si bajo V_1 no tira un 1 por 100 aleatorio, y bajo V_2 otro 1 por 100 aleatorio, las que no tiren ni con uno ni con otro serán solamente 1/100 del 1 por 100.

La independencia y, con ella, la pequeñez de la imbricación pueden darse solamente si V_1 y V_2 tienen direcciones muy distintas: si V_2 estuviese muy próxima a la dirección de V_1 lo probable es que no permitiese tirar a muchas chimeneas afectadas ya por V_1, — en el límite, desde luego, al coincidir con la dirección de este último viento, afectaría negativamente a las mismas chimeneas a que afectase V_1.

Por tanto, un sistema poliestable que esté sujeto a ciertas condiciones de independencia estadística (que sería preciso estudiar con mayor detalle) responderá a dos valores de un parámetro (o a dos perturbaciones, o dos estímulos) con dos conjuntos de variables, cuya imbricación dependerá de: 1) el volumen de la activación que cause cada uno, y 2) la semejanza entre uno y otro valor.

Supongamos ahora que estos valores correspondan, como en el apartado 10/8, a medios a los que sea menester adaptarse (o a problemas que sea preciso resolver). Como el sistema multiestable es asimismo poliestable, todo lo que acabamos de decir será también aplicable a aquel sistema: en el multiestable, pues, las dos líneas de comportamiento incluirán ensayos, y darán origen a cambios en los mecanismos de escalón y en las variables principales. En cuanto al grado de imbricación de los dos conjuntos de estos mecanismos que se activen, dependerá, una vez más, de la proporción que en cada caso se active y del grado de semejanza entre los dos valores del parámetro (o entre los medios); en particular, si las líneas de comportamiento se imbrican solamente en unos pocos mecanismos de escalón, el segundo conjunto de ensayos puede muy bien originar muy pocas modificaciones en los que ejercieran efecto en la primera reacción, y, por consiguiente, producir una pérdida de la primera adaptación muy pequeña. Así pues, *el sistema multiestable tenderá* (sin necesidad de ninguna modificación ulterior *ad hoc*) *a sacar partido de las situaciones recurrentes.*

16/13. Tiene interés advertir que cuando dos estímulos (o dos valores de un parámetro) son muy diferentes, el sistema multiestable tiende a dirigir las activaciones sobre unos conjuntos de mecanismos sumamente distintos; y que de este modo proporciona, sin que sea preciso recurrir a otras modificaciones con este fin preciso, un equivalente funcional del mecanismo discriminador de entrada, Δ, del apartado 10/9.

16/14. A la inversa, cuando las dos perturbaciones (o estímulos, o valores de un parámetro) tiendan a igualarse, la imbricación de los dos conjuntos activados tenderá a aumentar; y una imbricación de importancia de los mecanismos de escalón significa que el segundo conjunto de ensayos ejercerá un efecto fuertemente destructivo sobre la primera adaptación. Ahora bien, la tendencia que posee lo que se aprende en último lugar a trastornar lo que se haya aprendido antes no es, en modo alguno, un fenómeno desconocido en psicología; y cuando se estudian los hechos al respecto se advierte que sus detalles son asombrosamente parecidos a los que podrían esperarse si el sistema nervioso y su medio constituyesen un todo multiestable. La psicología experimental ha reconocido desde hace bastante tiempo la existencia de una "inhibición retroactiva"; los datos en que se apoya son muy conocidos, y demasiado numerosos para que los debatamos aquí, de modo que voy a presentar simplemente un ejemplo típico. Müller y Pilzecker han observado que si se aprende una lección y se somete a prueba su re-

tención tras un plazo de media hora, quienes no estudian durante este intervalo recuerdan el 56 por 100 de lo que habían aprendido, mientras que los que lo ocupan en aprender otras cosas recuerdan sólo el 26 por 100; y, en realidad, al pasar revista a los resultados pertinentes, Hilgard y Marquis consideran que la ubicuidad del fenómeno es suficiente para que se lo eleve a "principio de interferencia". Así pues, no puede haber duda en cuanto a su elevada frecuencia de aparición: lo último que se aprende tiende a acabar con lo antiguo.

En un sistema multiestable, cuanto más se parezcan los estímulos utilizados en el nuevo aprendizaje a los del aprendizaje anterior, más tenderá lo nuevo a trastornar lo antiguo, pues, en virtud del método de dispersión que hemos admitido, cuanto más se parezcan los dos estímulos mayor será el riesgo de que la dispersión lleve a unas variables comunes y a unos mecanismos de escalón también comunes. Mas en los experimentos psicológicos se ha visto repetidamente que cuanto más se parece lo aprendido últimamente a lo antiguo más marcada es la interferencia: así, Robinson hizo que los sujetos aprendiesen números de cuatro cifras, que realizasen otra tarea y que luego intentasen recordar aquellos números, y halló que la interferencia máxima se producía cuando la segunda tarea consistía en aprender más números de cuatro cifras; y, análogamente, Skaggs ha comprobado que la máxima pérdida de memoria que se produce después de aprender composiciones con cinco piezas de ajedrez corresponde al caso en que se hayan aprendido después otras figuras de la misma índole. Por tanto, la tendencia del sistema multiestable a desorganizarse por efecto de nuevas reacciones tiene su contrapartida en una tendencia análoga del sistema nervioso.

16/15. Debe notarse que al pedir que un modelo del cerebro presente, tanto inhibición retroactiva como capacidad para acumular adaptaciones, formulamos dos demandas opuestas: pues lo primero exige que las adaptaciones últimas *sean* destructoras de las anteriores, mientras que la capacidad mencionada pide que tales adaptaciones posteriores *no sean* destructoras de las que les precedieran. El homeóstato presentaba una inhibición retroactiva de intensidad máxima (cf. 10/5), ya que la segunda adaptación acababa enteramente con la primera; un conjunto de sistemas iterados, dotado de un mecanismo apropiado de discriminación de entrada, ofrece una capacidad máxima de acumular adaptaciones; y los sistemas multiestables de grado intermedio pueden ostentar ambos rasgos parcialmente, y, de este modo, parecerse al organismo vivo.

Las regulaciones auxiliares

17/1. El estudio de la adaptación nos había llevado al sistema ultraestable, y, luego, a ciertas dificultades — en el apartado 11/2 — acerca del tiempo que invertiría un sistema de este tipo en adaptarse; pero tales dificultades han quedado en su mayor parte resueltas gracias a haber aislado e identificado el sistema multiestable (lo cual no quiere decir que hayamos agotado la cuestión de la adaptación, que se aplica a innumerables casos particulares que merecen un estudio especial). En el presente capítulo y en el siguiente vamos a tomar en consideración otras objeciones que podrían plantearse contra la tesis de que el cerebro es, en un grado muy alto, multiestable; y al ocuparnos de ellas nos tropezamos con algunos aspectos nuevos de tales cuestiones que merecen toda nuestra atención.

La comunicación dentro del cerebro

17/2. Si admitimos a partir de este momento que lo que hemos expuesto en el apartado 16/6 y su figura (esto es, la formulación del sistema multiestable) resuelve, al menos en sus rasgos principales, el problema propuesto en el capítulo I, surge la pregunta de por qué en la parte inferior de la figura 16/6/1 (el organismo) no se ve enlace alguno entre unos subsistemas y otros. Esta ausencia, ¿no convierte tal representación en un disfraz de los hechos?: ¿un cerebro sin comunicación entre sus distintas partes?

17/3. En este asunto despojémonos de una vez para siempre de la idea — propugnada casi en todos y cada uno de los libros sobre el cerebro escritos el siglo pasado — de que cuanta más comunicación haya dentro del cerebro, mejor. Bastará que recordemos las tres maneras siguientes en que hemos visto que cierta función puede lograr su fin solamente si *no* se permite que se comuniquen entre sí ciertas parejas de variables, o si no se tolera que la comunicación que exista entre unas y otras aumente por encima de cierto grado.

1) En el apartado 8/15 hemos visto que cuando un organismo se adapta por medio de una serie discreta de ensayos, las variables esenciales deben hacer que cambien los mecanismos de escalón a un ritmo mucho más lento que el correspondiente a los cambios de las variables principales: una modificación demasiado rápida de tales mecanismos significa que no hay tiempo para que la comunicación acerca del carácter de apropiado o no apropiado de un conjunto de valores circule a través del cerebro y del medio, mientras se efectúa el ensayo, hasta llegar a las variables esenciales; de modo que éstas actuarán antes de tener la información necesaria. Por tanto, si para comprobar si un ensayo ha dado buen resultado o no se requieren diez segundos, es evidente que no deben producirse alteraciones con una frecuencia superior a la correspondiente a intervalos de unos once segundos; y si se necesitan diez años para observar del modo adecuado el efecto de una profunda reorganización de un organismo de la Administración, las reorganizaciones de esta índole no deberían llevarse a cabo con intervalor inferiores a once años. Así pues, el volumen de comunicación que pase de las variables esenciales a las funciones escalonadas puede ser perjudicial si es excesivo.

2) En el capítulo X hemos estudiado cómo podría sacar partido el organismo de las situaciones recurrentes, de forma que, tras haberse adaptado primero a *A* y luego a *B*, si *A* aparece otra vez pueda seguir en el acto el comportamiento apropiado a esta situación. En el apartado 10/8 hemos hecho ver que durante el período de adaptación a *B* los mecanismos de adaptación a *A tienen que no* resultar afectados por lo que acontezca a las variables esenciales, pues si tal comunicación se permitiera el efecto sería completamente dañoso.

3) En 16/11 se ha puesto de manifiesto que las posibilidades que tiene un sistema multiestable de adaptarse en un tiempo razonablemente corto están en relación muy estrecha con lo que se aproxime a la forma iterada; por tanto, cualquier adición de canales de comunicación separa el sistema de esta forma y, sean los que fueren sus otros efectos, aumenta el tiempo que se invierta en llegar a la adaptación.

Así pues, *en sistemas que se adaptan, hay ocasiones en que todo aumento del volumen de comunicación puede ser perjudicial.*

17/4. Puede aún objetarse que en la figura 16/6/1 deberían representarse conexiones directas entre las partes que reaccionan, ya que son necesarias para que pueda conseguirse una coordinación entre estas partes; pero es una objeción errónea, en realidad: no son *necesarias* tales conexiones. Expliquémoslo.

En primer lugar, podemos eliminar inmediatamente el caso en que las distintas partes del medio no se encuentren enlazadas (esto es, el caso de la figura 15/7/1), pues en tal situación lo que amenace a las distintas variables esenciales llegará independientemente, y habrá que responder a ello independientemente: aquí no hay necesidad alguna de coordinación entre las partes.

¿Qué ocurre en el caso de la figura 16/6/1, o sea, cuando las distintas partes del medio *están* enlazadas y cuando lo que ejecute, digamos, la parte que reacciona de *A* puede afectar, a través de la parte *B* del medio, a lo que suceda en la segunda variable esencial (esto es, de *B*)? Ahora es indudable que se necesita una coordinación entre las acciones de las dos partes que reaccionan, pues sólo es posible lograr que *todas* las variables esenciales se mantengan dentro de sus límites (que es el estado que se quiere alcanzar) si la actuación de cada una de las partes guarda la relación debida con lo que hagan las demás, ya que todas estas actuaciones se enfrentan con un medio común.

Dado, pues, que se exige una coordinación entre las partes que reaccionan, ¿acaso ello implica que estas partes han de estar en comunicación directa? Nada de eso, puesto que existe ya una comunicación entre ellas (en este caso que estamos considerando) *a través del medio.*

Podemos excusar al anatomista por pensar que la comunicación entre las partes del cerebro puede sólo tener lugar a través de algunas vías o fibras que puedan patentizarse anatómica o histológicamente; el estudioso de la función, sin embargo, debe percatarse de que también son posibles canales que pasen por el medio. (Tenemos un ejemplo elemental en la rección por el cerebro de la actuación de las cuerdas vocales gracias a una realimentación que pasa por el aire, al menos en parte, antes de llegar a aquél.)

Como este asunto tiene una importancia considerable en la teoría general acerca del modo de entrar en interacción el organismo y el medio, y como hasta ahora no le hemos prestado mucha atención (aun cuando lo hemos rozado en el apartado 5/13), consideremos un ejemplo que patentice de qué modo pueden coordinarse a veces las partes en funcionamiento del cerebro mediante un canal de comunicación que pase por el medio.

Pensemos en el jugador de tenis cuando saca. Con el brazo izquierdo efectúa un movimiento que lanza la pelota al aire, y un momento después el brazo derecho ejecuta otro, que — vamos a suponer — dispara la pelota correctamente al campo contrario. Supondremos también que,

por las razones que sean, los movimientos del brazo izquierdo no son invariables, sino que están sujetos a pequeñas variaciones aleatorias de una vez que saque a otra; y asimismo asumiremos que estas variaciones son perceptibles, de forma que, a menos que los movimientos del brazo derecho varíen también, y se correspondan del modo debido con los del izquierdo, la pelota saldrá probablemente fuera. Sin embargo, añadiremos la suposición de que los movimientos del brazo derecho *están* en correspondencia tal con los otros que la pelota llega efectivamente al sitio debido (la "posición del punto de llegada de la pelota" es la variable esencial, y sus límites normales son los del campo contrario).

Para que se produzca la coordinación *tiene que* haber algún canal que lleve del origen de las variaciones del brazo izquierdo a los movimientos del otro brazo (cf. *I. to C.*, apartado 11/11; la correspondencia demuestra lo mismo, según el apartado 4/13 del presente libro). Ahora preguntamos, ¿es necesario que este canal se encuentre dentro del cerebro?

No solamente no es necesario, sino que ordinariamente no se halla allí, como vamos a ver por el razonamiento siguiente. Consideremos la situación en el instante en que la pelota se encuentre en el aire: el movimiento que se está desarrollando en el brazo derecho ¿está guiado por mensajes provinentes del centro del izquierdo * o por los que procedan de la posición de la pelota en el aire? El criterio operativo (del apartado 4/12) es decisivo: supongamos que los movimientos del brazo izquierdo no se alteran, pero que la posición de la pelota varía (por efecto de una ráfaga de aire, por ejemplo), ¿se alterarán los movimientos del brazo derecho? Si un golpe de viento mueve la pelota, el jugador normal modifica en el acto estos movimientos de modo adecuado; y estas modificaciones hacen patente, en virtud de aquel básico criterio, que el brazo derecho está afectado inmediatamente (por lo menos en parte) por la posición de la pelota en el aire. Así pues, en el tenis, lo normal es que el jugador que saca coordine sus movimientos con los brazos izquierdo y derecho por el siguiente método: el primero lanza al aire la pelota con exactitud no perfecta, y la posición de ésta en el aire guía (a través de la visión) el brazo derecho. En la figura 17/4/1 hemos representado el diagrama de efectos inmediatos, procurando que sea visible su correspondencia con la figura 16/6/1.

Así pues, dentro de las suposiciones que acotan este ejemplo, la

* Hemos de evitar las complicaciones procedentes del hecho de que el brazo derecho esté mandado por el córtex motor izquierdo, y lo mismo con el otro lado.

coordinación entre las partes puede tener lugar a través del medio: no es necesario que siempre se produzca en el interior del sistema nervioso.

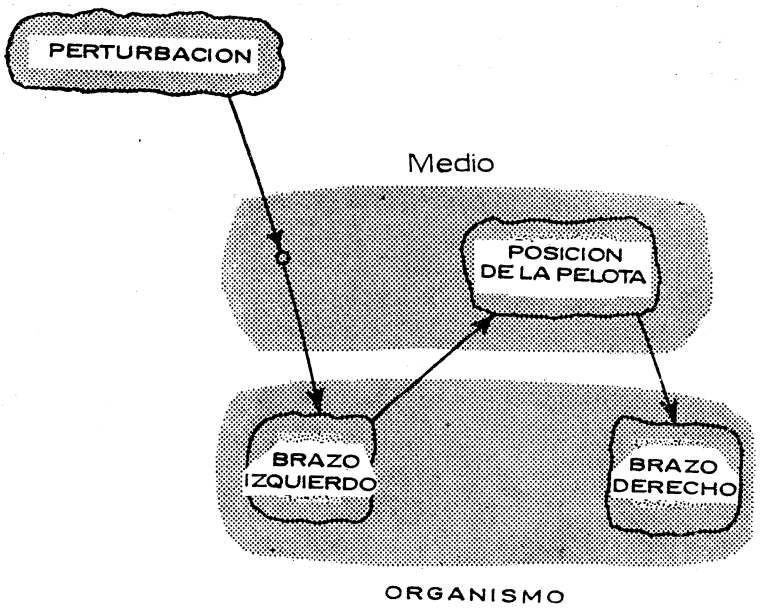


FIGURA 17/4/1.

17/5. Una vez hechas estas observaciones es posible que empiece uno a pensar por qué habría de haber, en absoluto, conexiones entre las distintas partes del cerebro. Mas, al menos, existen dos razones en su favor.

La primera procede del hecho de que, en la incesante lucha del organismo por defender las variables esenciales frente a las perturbaciones, el conseguir que le llegue lo antes posible la información acerca de éstas constituye una ventaja fundamental (podemos aceptar este hecho como evidente o demostrarlo de modo más formalizado, según hacemos en *I. to C.*, apartado 12/5); ahora bien, aunque muchas de las perturbaciones que amenazan alguna variable esencial proceden en último término del medio, algunas pueden proceder de otras partes del organismo mismo. Por ejemplo, todos los niños descubren, cuando están aprendiendo a comer por sí mismos, que se pueden hacer daño en los labios lo mismo con objetos del medio que debido a sus propias tentativas de introducir en la boca, estando cerrada, una cucharada de comida: para no darse un golpe en los labios tienen que

abrir la boca antes de que llegue la cuchara; y para que ello sea posible, la información acerca de que la cuchara se aproxima ha de llegar al "centro de la boca" antes de que ésta llegue efectivamente.

Hay veces en que tal información puede pasar por el medio (cuando el niño se fija en la cuchara), y entonces el diagrama de efectos inmediatos es el siguiente:

Pero si, por la razón que sea, no es posible establecer la comunicación de la mano a la boca a través del medio, es *necesario* que acontezca dentro del cerebro (del centro de la mano al de la boca) para que ésta se abra antes de que llegue la cuchara. Así pues, es claro que la comunicación intracerebral puede ser necesaria o conveniente.

17/6. Podemos bosquejar ahora una segunda razón acerca de lo ventajosa que puede ser esta comunicación, aun cuando para tratar de ella con rigor se precisan los conceptos de *I. to C.*, apartado 7/7.

Cuando se describe un sistema, éste comienza por ser un miembro de una clase muy grande de formas posibles; y al ir añadiendo especificaciones, la clase a que perteneciese se va estrechando. Partamos de un sistema cuya única restricción consista en tener fijado el número de estados posibles; si ahora adjuntamos la especificación de que "su diagrama de efectos inmediatos incluya todas las flechas posibles", las posibilidades que posean sus campos quedan restringidas de modo muy ligero; en cambio, si hubiésemos añadido que tal diagrama contuviese *pocas* flechas, la restricción impuesta sobre dichas posibilidades hubiese sido muy grave.

Así pues, a igualdad de todo lo demás, cuanto menor sea el número de enlaces menores serán los modos de comportamiento accesibles al sistema; y, desde este punto de vista, pueden ofrecer ventajas las conexiones adicionales del interior del cerebro, ya que *hacen posible un repertorio mayor de comportamientos.*

Otra manera de considerar el mismo hecho consiste en parar mientes en las partes que reaccionan antes de que se las enlace; en esta situación es menester que los parámetros que se vayan a emplear para enlazarlas tengan unos valores fijos (pues de otro modo las partes no estarían determinadas por estados). Así pues, antes de efectuar la

conexión cada parámetro tiene que estar fijado en *uno* de sus posibles valores, en tanto que una vez realizada tiene que ser capaz de variar cuando lo afecten las otras partes; y con esta variación habrá sobrevenido a la parte que consideremos una variedad correspondiente de campos posibles y de formas de comportarse (cf. 6/3); de ahí que el enlace, al movilizar parámetros que de otro modo permanecerían fijos, aumente la variedad posible de comportamientos.

Podemos admitir ahora, sin miedo de ninguna mala inteligencia, que la figura 16/6/1 hubiera sido más realista si hubiésemos dibujado algunas conexiones entre las partes que reaccionan. Pero la presentación y el debate del apartado 16/6 han sido más sencillos sin ellas.

17/7. Si bien el aumento del número de conexiones entre las partes que reaccionan del organismo da lugar a las dos ventajas que acabamos de explicar, origina asimismo, como hemos visto en el apartado 16/4, la desventaja de alargar el tiempo exigido para la adaptación (y a veces en grado enorme). Sin duda alguna, existen aún más factores que entran en el resultado final y con los que hay que contar, pero lo que hemos visto basta para hacer patente que *la abundancia de conexiones entre las distintas partes del cerebro presenta tanto ventajas como inconvenientes.* Es evidente que el organismo tiene que desarrollarse de modo que el cerebro llegue, a este respecto, a un punto óptimo.

No pretendemos que se necesite alcanzar tal situación en un sentido estricto: la operación de encontrar un valor óptimo es mucho más compleja que la de hallar un valor aceptable de acuerdo con un criterio dado. Así, supongamos que una persona llegue a un mercado extranjero en el que se vendan cien clases de fruta enteramente nuevas para ella; para encontrar el tipo *óptimo* para su paladar es necesario que: 1) pruebe las cien, 2) efectúe, al menos, noventa y nueve comparaciones y 3) recuerde sus resultados de modo que pueda, por fin, volver a la clase óptima; mientras que, por otra parte, para encontrar una clase de fruta aceptable basta que las pruebe sucesivamente y al azar (sin preocuparse de recordar lo que haya experimentado antes), y que se detenga sólo en cuanto haya llegado a una que pase satisfactoriamente la prueba. Por tanto, pedir el valor óptimo puede ser excesivo; lo único que se necesita es que el organismo consiga alcanzar un estado o un valor que se encuentren *entre unos límites dados.*

Así pues, para que el organismo se adapte con cierta eficiencia frente a su medio terrestre es necesario que el grado de conexión entre las partes que reaccionan se halle dentro de ciertos límites.

Las regulaciones auxiliares

17/8. "Dentro de ciertos límites": ¿no hemos oído ya antes esta frase? ¿Estamos razonando circularmente? Realmente no es así, pues se trata de dos adaptaciones distintas, de dos tipos de niveles u órdenes.

Con objeto de percatarnos de estas dos adaptaciones y de la relación existente entre ellas, recordemos que habíamos empezado (en el apartado 3/14) por suponer que ciertas variables esenciales habían de mantenerse dentro de unos límites; llamémoslas E_1, E_2, E_3 y E_4 (claramente visibles en la figura 8/2/1); el mantener*las* dentro de unos límites es un tipo de adaptación. En el capítulo XI hemos añadido otra variable esencial, *F* (el *tiempo* que requieren las cuatro *E* para alcanzar la estabilidad dentro de sus límites); y mantener*la* en el interior de unos límites constituye otro tipo de adaptación. Esta *F* es enteramente distinta de una quinta *E*, que ingresaría en el sistema por una vía absolutamente diversa de ésta; y, sin embargo, *F* se incorpora al todo como variable esencial, pues a partir de 11/2 hemos tratado una y otra vez del caso en que tiene ciertos límites que no queremos exceder. (En 3/15 mencionábamos la posibilidad de que existiesen varias clases de variables esenciales.)

Las *E* —los cuatro relevadores del homeóstato, digamos— son, sin duda alguna, homólogas y equivalentes; pero la *F* entra a formar parte del conjunto total de una manera enteramente diferente. Para ver cómo lo hace, supongamos que lo más importante de todo (para cierta variable esencial de tipo superior, $\mathcal{E}$) es que en una variable esencial de índole no tan elevada, *E*, se consiga acertar en menos de cien ensayos (esto es, *F* ha de ser inferior a 100); según vaya efectuando ensayos *E* se producirá cambio tras cambio en sus correspondientes mecanismos de escalón, mas al mismo tiempo *F* se irá acercando sin cesar a su límite (un agotamiento progresivo, acaso); ¿qué ocurrirá si esta última variable traspasa el límite de 100? Si $\mathcal{E}$ es tal que el organismo muere, ya no hay nada que decir; pero si no es absolutamente esencial, nos encontramos en la situación de haber realizado muchos ensayos de cierta forma que no ha sido capaz de lograr rápidamente lo que se pretendía (se trata de las circunstancias de que nos ocupábamos en el capítulo XI). ¿Qué es lo que hay que hacer? En virtud del método de la ultraestabilidad, al pasar *F* más allá de su límite deben inducirse ciertos cambios, pero es evidente que éstos no han de producirse simplemente en los mismos mecanismos de escalón sobre los que operase *E*, pues, de ser así, la acción ejercida por *F* no se distinguiría del ensayo nú-

mero ciento uno efectuado por *E*: para que *F* cause un efecto apropiado, al transgredir su límite deben originarse cambios en las condiciones que hubieren permanecido *sin modificación* a lo largo de los cien ensayos de *E*; es decir, los nuevos ensayos que realice *E* no tienen que consistir en ulteriores muestras tomadas del mismo conjunto, sino que se debe pasar a muestras de un nuevo conjunto. Así, si el organismo es un gato encerrado en una caja, y si ha llevado a cabo 100 ensayos manipulando las palancas y objetos que allí se hallen, pero sin éxito, es ya momento de que efectúe otros tomados de una nueva población estadística —de que pase, quizá, a diversas formas de maullidos y llamadas.

Así pues, la mejora de la velocidad de adaptación de *E* que se consigue eligiendo un valor apropiado de los mecanismos de escalón mandados por *F* no es lo mismo que efectuar una elección en los mecanismos de escalón que *E* misma deba elegir: cuando se proporcionan a un examinando pluma, papel y un lugar tranquilo podemos decir que "se lo ayuda", pero se trata, evidentemente, de algo muy distinto de la "ayuda" que le dijese cómo responder a la pregunta concreta planteada; pues bien, *F* "ayuda" a las *E* solamente en el primer sentido, no en el segundo.

Por tanto, la conclusión del apartado 17/7 (esto es, que para que un organismo se adapte con una celeridad razonable han de mantenerse ciertos parámetros dentro de ciertos límites) no involucra una petición circular, ya que las dos elecciones operan a niveles distintos, es decir, en conjuntos diferentes.

17/9. En ningún momento pretendemos que todos los organismos que se encuentran en la naturaleza tienen variables esenciales que se puedan dividir limpiamente en niveles (así el de *E*, el de *F*, etc.). ¡Ojalá fuese así! Cuando ello ocurre es posible dividir en fragmentos la totalidad del acto de adaptación (que, en realidad, dura toda la vida, como vimos en 10/2), y el hombre de ciencia puede estudiar el sistema fragmento por fragmento y, de este modo, simplificar considerablemente su estudio. En parte, al proyectar el homeóstato se prepararon las cosas para que pudieran distinguirse con claridad dos niveles: 1) las cuatro variables continuas de los imanes, y 2) las variables discontinuas de los uniselectores. *Cuando* un sistema posee esta división interna natural, el observador puede sacar partido de semejante hecho para describir el todo, con sus complejidades, en tres etapas, cada una de ellas mucho más sencilla: el sistema continuo y sus propiedades, el discontinuo y *las suyas*, y la interacción entre uno

y otro. Pero cuando la totalidad del sistema no es divisible de este modo, continúa siendo meramente un todo terriblemente complejo, no susceptible de reducción, y, por tanto, tan recalcitrante ante el científico como los ejemplos del apartado 16/3.

Este libro se ocupa, inevitablemente, del caso en que las variables esenciales son claramente divisibles en niveles: unos, primarios (los de E_1, E_2, E_3 y E_4), de los que hemos hablado en los capítulos VII a X, y, luego, el tajantemente diferenciado de la F (desde el XI hasta el capítulo presente). De este modo hemos seguido una vez más la estrategia del apartado 2/17, o sea, la de llegar a una comprensión clara de los casos más tratables, de forma que puedan servir de base para alcanzar, al menos, una visión panorámica de lo intratable; y el lector puede darse cuenta ahora de que la sencillez de los primeros capítulos era esencialmente un artificio didáctico, sin paralelo en la complejidad efectiva de los organismos reales. De hecho, ésta es mucho mayor (superior en varios órdenes de magnitud) que la que hemos venido considerando: así, en la figura 7/5/1, la parte que reacciona, R, que parece tan sencilla, no solamente puede incluir las complejidades de un sistema multiestable (figura 16/6/1), sino también (en los organismos superiores) muchos subsistemas que tengan, a su vez, la forma representada en la figura 7/5/1, y cada uno de ellos dotado de sus propias variables subesenciales y sus subadaptaciones; pues muchas veces se logran las adaptaciones a objetivos a largo plazo hallando unos conjuntos apropiados de submetas, posiblemente organizados en unas secuencias complicadas en cuanto al momento y las condiciones de cada una. Por consiguiente, una vez que nos hemos valido de las formas que aparecen en las figuras que acabo de mencionar para apoyar la intelección, hemos de estar dispuestos a admitir que en el cerebro de verdad operan estos mismos principios con una complejidad de un orden absolutamente superior, y que puede muy bien resultar que jamás se encuentre al alcance de la comprensión *pormenorizada* del hombre de ciencia (cuyo C.I. se encuentra, a todos los propósitos prácticos, por debajo de 200).

Una vez admitido esto, continuemos el examen de los casos en los que es factible cierta división en niveles y que, por tanto, son fáciles de entender.

17/10. En el capítulo VII se mostró que el sistema ultraestable simple resuelve el básico problema de mantener las variables esenciales primarias dentro de sus límites; pero en el XI nos hemos dado cuenta de que aunque se consiga la adaptación en un sentido puramente ló-

gico de este término, puede producirse con un grado de eficiencia tan bajo que carezca de toda utilidad práctica. Si queremos encontrar un mecanismo que se parezca al cerebro vivo, y especialmente al humano, tenemos que hallar uno que no solamente se adapte en un sentido nominal, sino con una eficiencia verdaderamente elevada (en el apartado 17/7 hemos visto que ésta implica que el grado de conectividad intracerebral se ajuste a una gama encerrada dentro de ciertos límites).

Ahora podemos advertir explícitamente que existen otros parámetros que será preciso reajustar también para que el grado de adaptación sea más que meramente nominal; algunos de ellos los hemos mencionado ya, de pasada:

1) En 8/15 nos percatamos de que la *duración del ensayo* pedía un ajuste; éste se realizaba en dicho apartado, desde luego, por el operador, que intervenía antes de que se dibujasen las gráficas de comportamiento del homeóstato (y no dijimos nada de la manera de efectuarlo *automáticamente* en el organismo).

2) En el apartado 7/7 pedíamos que las variables esenciales actuasen sobre los mecanismos de escalón de una forma determinada: cuando se tiene "malo", búsquese otra cosa; cuando es "bueno", aférrese uno a ello. Mas no indicamos nada de cómo habría de dar lugar el organismo a esta relación concreta.

3) En 10/8 hacíamos ver que si un sistema ultraestable se ha de adaptar con éxito a una situación recurrente, es necesario algún *mecanismo de discriminación de entrada* (sin decir nada sobre el modo en que el organismo podría adquirirlo).

4) El apartado 13/11 mostró toda la importancia que tiene el valor del parámetro "abundancia de estados de equilibrio entre todos los de las partes"; pero no nos explicamos acerca de cómo podría ajustárselo dentro de límites satisfactorios.

Sin duda alguna, existen otros a los que no hemos aludido; uno de ellos, de importancia fundamental, merece por sí mismo un apartado.

La distribución de la realimentación

17/11. Si es que la adaptación ha de ser algo más que meramente nominal, es necesario efectuar otro ajuste, que, en realidad, ya habíamos hecho en la figura 16/6/1 (en donde, por tanto, dábamos por resuelta una cuestión de gran importancia): si en esta figura partimos del medio de un subsistema cualquiera y trazamos un recorrido a través de la variable esencial a que afecte, el mecanismo de escalón

correspondiente, la parte que reacciona y otra vez al medio, nos encontramos en el mismo subsistema en que habíamos comenzado; así pues, en tal diagrama está implicado que si una parte del medio altera una variable esencial, E_1, digamos, las acciones procedentes de ésta acabarán por afectar a aquella parte del medio que hubiese originado todas las dificultades.

Esta correspondencia favorece la eficacia de la adaptación, indudablemente, como puede verse siguiendo de modo explícito lo que ocurriría en otro caso. La claridad del razonamiento es máxima cuando los sistemas están iterados, como se representa en la figura 15/7/1; y vamos a suponer, en ella, que se rompiesen las bucles de segundo orden y que se los reconectase luego al azar, con lo que la variable esencial de *A* afectaría a la parte que reacciona de *B*, por ejemplo; una perturbación de *A* a la que esta parte no estuviese adaptada daría origen a cambios en los mecanismos de escalón de *B*, por muy bien adaptados que estuviesen éstos para hacer frente a cualquier perturbación que les llegara [antes de la ruptura]. Así pues, si las realimentaciones de segundo orden no estuvieran distribuídas del modo apropiado, los efectos procedentes de las variables esenciales cambiarían en forma aleatoria, y destruirían las adaptaciones pequeñas que se hubiesen conseguido antes; por consiguiente, en tal caso no pueden conservarse las adaptaciones correctas de los subsistemas, ni cabe avanzar de modo acumulativo hacia la adaptación (proceso que en el capítulo X vimos que tenía una importancia fundamental): semejante sistema seguiría adaptándose de la misma forma que el homeóstato, pero invertiría en ello el excesivo tiempo T_1 en lugar del moderado T_3 (confróntese 11/5).

No es posible fijar de una vez para siempre las realimentaciones de segundo orden, pues existe una parte de cada circuito que está determinada por el medio (o aportada por él), y que, por tanto, se encuentra sujeta a cambios: es menester que el organismo, frente a ellos, efectúe reajustes para que la distribución siga siendo apropiada.

Tenemos un ejemplo muy corriente, que ilustra la necesidad de saber *dónde* hay que aplicar una corrección, en la persona que ambiciona jugar bien al ajedrez y que reflexiona sobre cómo debería cambiar en el futuro su estrategia; es frecuente que tenga una aguda conciencia de su inseguridad acerca de *dónde* tendría que efectuar la corrección: ¿debería estudiar las últimas jugadas y cambiar de táctica?; ¿sería mejor que evitase en adelante aquel tipo de juego medio? o, acaso, ¿no tendría que dejar de abrir con P4D y sustituirlo por P4R? El jugador de ajedrez novicio no sólo tiene que resolver

el problema de cuáles han de ser las jugadas que efectúe a continuación, sino asimismo el de dónde reintroducir (realimentar) las correcciones; y, por tanto, es muy posible que muchos jugadores sean flojos simplemente porque cuando pierden una partida cambian la apertura en lugar de variar el final.

(En este ejemplo las "partes" que es preciso modificar se suceden en una hilera temporal, y las alteraciones tienen que encontrar el lugar oportuno en la sucesión; de este modo vale para recordarnos que los diagramas de efectos inmediatos —así el de la figura 16/6/1— representan relaciones *funcionales,* no estructurales ni anatómicas).

17/12. En los dos últimos apartados hemos visto que es menester llevar a cabo al menos cinco regulaciones auxiliares para que el básico proceso de la ultraestabilidad logre la adaptación con eficacia y rapidez aceptables; por tanto, la pregunta siguiente es: ¿cómo pueden conseguirse estas regulaciones **auxiliares**?

17/13. Es posible contestar a ella con cierta seguridad, ya que todos los procesos reguladores están regidos por la ley de la variedad necesaria (que hemos descrito en *I. to C.*, capítulo XI; aquí daremos solamente los pormenores que sean precisos).

Esta ley (de la cual el teorema 10 de Shannon, relativo a la supresión del "ruido", constituye un caso particular) dice que si un regulador impide que cierto *volumen* de perturbaciones alcance a unas variables esenciales, tiene que ser capaz de efectuar, como mínimo, tal volumen de selección. (En caso de que no se cumpliese esta ley se tendrían unos efectos apropiados sin causas apropiadas, tal como ocurriría si un examinando respondiese acertadamente antes de habérsele propuesto las preguntas (cf. 7/8); los científicos operan en el supuesto de que no ocurren semejantes cosas y, hasta ahora, no han encontrado hecho alguno que les haga poner en duda tal suposición). Así pues, para que se disponga de las regulaciones auxiliares es menester que exista un proceso de selección de intensidad apropiada; ¿dónde podremos encontrarlo?

El biólogo, desde luego, puede responder inmediatamente a esta pregunta: pues los trabajos del siglo pasado, y en especial de sus últimos treinta años, han demostrado sin ningún género de duda que la selección natural (darwiniana) es responsable de todas las selecciones que tan abundantemente nos presenta el mundo biológico; y, por consiguiente, las regulaciones auxiliares aludidas tienen que atribuirse a la selección natural. De ahí que actúen sobre el individuo

(nuestro gatito, acaso) bien en virtud de su configuración de genes, bien por haberse desarrollado merced a su propia ultraestabilidad: no hay ninguna otra fuente posible.

17/14. Sin embargo, el tema de la adaptación de mecanismos análogos al cerebro interesa hoy a un auditorio mucho más amplio que el biológico; y por ello voy a exponer brevemente tales procesos de selección, con objeto de que el lector sin formación biológica pueda ver exactamente cómo pueden adquirir regulaciones auxiliares los cerebros no vivientes.

Esta exposición tiene, al mismo tiempo, una segunda finalidad. Pues, hasta ahora, en este libro hemos seguido el método de empezar — en el capítulo I — por el hecho de la adaptación como efecto y nos hemos remontado a sus causas; mas esta dirección del razonamiento no es la natural, ya que éste avanza de un modo mucho más sencillo y claro cuando empezamos por un estado inicial y preguntamos qué va a suceder a partir de aquel momento; me propongo, por tanto, esbozar el proceso en la dirección natural, y hacer patente que, cuando se comienza por cierto punto de partida sumamente general, la adaptación es un resultado inevitable.

Cómo se amplifica la adaptación

La selección en el sistema determinado por estados

18/1. El origen de las selecciones no es ya un problema en cuanto nos damos cuenta de que la selección, lejos de ser una rareza, es algo que efectúa *todo* sistema determinado por estados, en mayor o menor medida (cf. *I. to C.*, apartado 13/19); en un sistema de este tipo, dado que dos líneas de comportamiento pueden reunirse en una sola, pero ninguna puede convertirse en dos, *el número de estados en que le es posible hallarse no puede sino decrecer.*

Esta selección es perfectamente conocida, pero en sistemas sencillos presenta sólo una forma trivial; el reloj accionado por resorte, por ejemplo, es selectivo con respecto al estado de haberse agotado la cuerda: cualquiera que sea el estado de tensión parcial ("cuerda") dada al resorte, siempre marchará hasta agotarla, estado en el que permanecerá. La observación de que las máquinas se dirigen al equilibrio, que se hace tan frecuentemente, expresa la misma propiedad.

Así pues, en sistemas muy sencillos ésta parece trivial, pero cuando se hacen más complicados se enriquece y convierte en mucho más interesante. Podemos considerar el homeóstato, por ejemplo, simplemente como un sistema dotado de imanes y uniselectores que se dirige hacia un equilibrio parcial, al que se aferra; mas tal equilibrio, por ser solamente parcial, tiene un contenido mucho más rico que el reloj al que se le haya acabado la cuerda: los uniselectores permanecen inmóviles, pero los imanes pueden seguir variando de dirección, y el equilibrio parcial manifiesta una homeóstasis dinámica *seleccionada* merced al proceso de dirigirse al equilibrio los uniselectores. Por tanto, este aparato empieza a mostrar algo de la abundancia de propiedades que surge cuando el sistema es suficientemente complejo o grande, a saber: 1) una elevada intensidad de selección gracias a haberse dirigido al equilibrio, y, asimismo, 2) la posesión de un tamaño suficiente (pese a que el conjunto seleccionado de estados constituye una proporción muy pequeña del total) para dar lugar a una amplia gama de

actividades dinámicas. De modo que *es preciso que no consideremos como un acontecimiento excepcional y notable la selección de equilibrios complejos, en los que el observador pueda descubrir el fenómeno de la adoptación: ello* **constituye la regla,** *y no la excepción.* Y la razón principal por la que no hemos visto hasta ahora que sea así reside en que nuestro mundo terrestre presenta, *grosso modo,* una distribución bimodal de formas: o bien éstas son sumamente sencillas (como el reloj al que se ha agotado la cuerda), de modo que las damos de lado desdeñosamente, o enormemente complicadas, de las cuales pensamos que consisten en algo muy distinto y decimos que tienen vida.

18/2. Hoy podemos ver que ambas formas son simplemente los dos extremos de una escala única: el homeóstato comenzó a proporcionarnos formas intermedias, y las máquinas modernas (en especial las computadoras digitales) permitirán, sin duda alguna, interpolar aún otras, hasta que podamos ver la unidad esencial de toda la gama.

No es difícil inventar más ejemplos de formas intermedias. Voy a presentar uno que muestra claramente que, en *cualquier* sistema dinámico determinado por estados, existen algunas propiedades que tienen mayor tendencia a persistir — o a "sobrevivir" — que otras. Supongamos que una computadora posea cien lugares de almacenamiento, rotulados de 00 a 99, en cada uno de los cuales se encuentre inicialmente un [guarismo] dígito decimal (esto es, una de las cifras 0, 1, 2, ..., 9) elegido aleatoria, independiente y equilibradamente, y que tenga, además, una fuente de números aleatorios (obtenidos, preferiblemente, mediante agitación molecular, térmica). Efectuemos reiteradamente la siguiente operación:

Tómense dos números al azar, cada uno formado por dos dígitos; supongamos que salen 82 y 07. En este caso, multiplíquese los números que se hallen en los lugares de almacenamiento 82 y 07, y reemplácese el dígito que se encontrase en el primero de ellos (esto es, el 82) por el que ocupe el lado derecho del producto.

Ahora bien, impar $\times$ impar da impar, y par $\times$ par da par; pero impar $\times$ par da par, de modo que el número que se encontrase en el primer lugar de almacenamiento puede pasar de impar a par, pero no a la inversa; y, por consiguiente, dichos lugares, que inicialmente contendrían una cantidad aproximadamente igual de cifras impares que de pares, pasarán a tener un número cada vez mayor de pares, y las impares desaparecerán gradualmente. El biólogo podría decir que en la "lucha" por ocupar los lugares de almacenamiento y sobrevivir, los

pares llevan ventaja e, inevitablemente, acabarán por exterminar a los impares.

En realidad, incluso entre los pares hay grados de capacidad para sobrevivir: los ceros tienen muchas más posibilidades que los demás pares, de suerte que, a medida que el proceso avance, el observador verá que aquellas cifras se van apoderando de todos los lugares de almacenamiento (y, por fin, exterminarán completamente a sus competidores).

18/3. Este ejemplo no presenta dificultades de comprensión, pero se encuentra intranquilizadoramente próximo a la trivialidad; por otra parte, sería fácil preparar otros ejemplos más complejos, mas no nos dirían nada de los principios que operan [por debajo] (aun cuando serían más valiosos y convincentes); lo que todos ellos permitirían ver es que cuando se efectúa reiteradamente una operación uniforme * en un conjunto de estados, el sistema (del cual dicha operación constituye las "leyes") tiende a los estados que no estén afectados por ella, o que lo sean en grado inferior al ordinario: dicho de otro modo, *toda operación uniforme tiende a seleccionar formas con una capacidad especial para resistir a su efecto inductor de cambios.* En sistemas muy sencillos este hecho constituye casi una perogrullada, en los complicados todo menos esto; y cuando aparece en una escala realmente magna —en un sistema dotado de millones de variables y a lo largo de millones de años—, es probable que los estados así seleccionados sean verdaderamente notables, y que ostenten una destacada *coordinación entre sus partes* que tienda a hacer éstas inmunes frente a aquella operación.

Así pues, es preciso que no veamos el desarrollo de la vida sobre la tierra como algo notable: por el contrario, era inevitable; y ello en el sentido de que si se mantiene un sistema tan grande como la superficie terrestre y básicamente poliestable hirviendo suavemente en los aspectos dinámicos durante cinco mil millones de años, sólo un milagro podría impedir que llegase a unos estados en que las variables se reúnan en formas fuertemente autoconservadoras. El *volumen* de selección realizado por tal sistema (del cual conocemos únicamente un ejemplo) pertenece a un orden de magnitud tan inmensamente superior a cuanto experimentamos como individuos, que es muy natural que tengamos algunas dificultades en percatarnos de que este proceso es, en el fondo,

* En el sentido en que se dice (en Matemáticas) que una función es uniforme, esto es, cuando cada aplicación suya da lugar a *un solo* resultado. (*N. del T.*)

el mismo que el que observamos trivialmente en nuestros sistemas cotidianos; y, sin embargo, así es, aun cuando la mayor extensión en el espacio permite que se ensaye un número de formas increíblemente mayor, y su mayor dilatación temporal da ocasión a que éstas se elaboren y entretejan en una coordinación intrincadísima, de un grado fabulosamente superior.

Podemos rastrear, pues, a partir de un origen perfectamente natural, las configuraciones de genes que hoy habitan la tierra; no nos sorprende que en ésta se hayan desarrollado formas que muestren, en conjunción con sus respectivos medios, la más asombrosa capacidad para resistir a las acciones inductoras de cambios del mundo en torno suyo; pues no resisten de la misma manera estática y poco interesante en que lo hacen un trozo de granito o un reloj al que se le haya agotado la cuerda, sino de otro modo, dinámico y de mucho mayor interés: formando a su alrededor intrincados sistemas dinámicos (lo que llamamos sus "cuerpos", juntamente con ciertas extensiones de éstos, como nidos y utensilios) tales que el todo sea homeostático y autoconservador por medio de defensas *activas.*

18/4. Lo que en este libro nos concierne es el hecho de que las defensas activas puedan ser *directas* o *indirectas;* de las primeras hemos hablado sólo en el apartado 1/3, e incluyen todos los mecanismos reguladores que las configuraciones genéticas aludidas especifican *en detalle*; en cuanto a su adaptación, procede de que las condiciones que las han reclamado han permanecido constantes a lo largo de muchas generaciones.

Las formas iniciales de dichas configuraciones se adaptaban únicamente de esta manera; en cambio, las posteriores han adquirido una especialización que las permite defenderse frente a una clase de perturbaciones ante la cual las primeras eran vulnerables; esta clase consta de las que, si bien no se conservan constantes durante un lapso de muchas generaciones (y, por consiguiente, los genes no pueden adaptarse a ellas, ya que el cambio es demasiado rápido), lo son, al menos, durante el correspondiente a una sola generación. Cuando las perturbaciones de este tipo son frecuentes, ofrece grandes ventajas la formación de un mecanismo de adaptación que, 1) esté regulado en sus líneas generales por la configuración de genes (ya que se necesitan los mismos rasgos generales durante muchas generaciones), y 2) lo esté en sus pormenores por los detalles que se presenten ante la generación del caso.

Este es el mecanismo del aprender, cuya peculiaridad reside en

que la configuración dicha delega parte de su dominio y regulación del organismo al medio; esto es, no especifica circunstancialmente, cómo tiene el gatito que cazar al ratón, pero proporciona un mecanismo de aprendizaje y cierta tendencia a jugar, de modo que es *el ratón* quien le enseña los extremos de mayor finura acerca de cómo se cazan ratones.

Tal es la regulación (o adaptación) por el método indirecto: la configuración de los genes no dicta, como si dijéramos, sino que pone al minino en situación de ser capaz de formar su propia adaptación, guiado en los pormenores por el medio.

18/5. Ahora podemos responder a la pregunta planteada en 17/12, y ver cómo ha de aplicarse la ley de la variedad necesaria a la cuestión acerca de la manera de conseguir las regulaciones auxiliares — es decir, acerca de cómo quepa llevar los parámetros pertinentes a los valores respectivamente apropiados.

Algunos pueden ajustarse por efecto directo de la configuración de genes: el organismo nace, en este aspecto, con los valores debidos. Para que tal cosa haya sido posible, las condiciones ambientes tienen que haber sido constantes a lo largo de un tiempo suficientemente largo, y los procesos de selección natural tienen que haber sido suficientemente intensos y haber perdurado durante el plazo suficiente para que la selección natural se haya ejercido de modo que satisfaga aquella ley.

Ciertas regulaciones auxiliares pueden quedar ajustadas por la configuración de los genes en una sola etapa; en este caso, dicha configuración fija unos valores que dan lugar a la aparición de un mecanismo (en realidad, un regulador) que a su vez, por *su propia* actividad, hará que los parámetros alcancen los valores apropiados.

Otras pueden llegar al ajuste en dos etapas a partir de la configuración mencionada; mas no es necesario que nos ocupemos de esta cuestión más en detalle, ya que los sistemas reales muy rara vez están dispuestos nítidamente en dos niveles (cf. 17/9): basta con que advirtamos que puede conseguirse la adaptación en virtud de la configuración de genes ya sea directa o indirectamente.

La amplificación de la adaptación

18/6. El método consistente en adaptarse aprendiendo es la única forma de lograr hacerlo cuando la constancia de aquello que requiera la adaptación sea demasiado breve para que la configuración de genes

pueda adaptarse; y ya sólo por esta razón podía esperarse que la habíamos de encontrar en los organismos más avanzados. Mas se trata de un método que posee una ventaja sumamente especial, merecedora de que caigamos en la cuenta de ella, en particular cuando consideramos la limitación que implica la ley de la variedad necesaria y preguntamos *cuánta* regulación puede lograr en uno y otro caso la configuración genética.

La regulación directa y la indirecta acontecen del modo siguiente. Supongamos que sea preciso mantener una variable esencial, X, entre los límites x' y x''; entonces, cuanto actúe directamente sobre X de modo que lo mantenga entre tales límites será directamente regulador. Puede ocurrir, sin embargo, que se disponga de un mecanismo, M, que afecte a X, y que actúe como regulador (manteniendo esta variable entre los límites dichos) con tal de que cierto parámetro (para M), P, se conserve entre los límites p' y p''; si ahora actúa sobre P un agente selectivo cualquiera y lo mantiene entre p' *y* p'', el resultado final será, una vez que haya actuado M, que X no sale de entre los límites x' y x''.

Ahora bien, en general, los volúmenes o cantidades de regulación que se necesiten para mantener la variable indicada entre sus límites y el parámetro entre los suyos son independientes uno de otro (la ley de la variedad necesaria no los vincula entre sí); por consiguiente, puede suceder que un volumen de regulación *pequeño* aplicado a P origine otro mucho mayor sobre X.

Cuando la regulación es directa, el volumen de ella que actúe sobre X estará absolutamente limitado por el que pueda proporcionársele a esta variable (en virtud de la ley de la variedad necesaria); en cambio, cuando es indirecta *puede afectar a X una regulación mayor que la proporcionada a P*. De suerte que la regulación indirecta hace posible *amplificar* el volumen de regulación; y de ahí su importancia.

18/7. Los organismos vivos han encontrado esta posibilidad hace eones: pues la configuración de genes es un canal de comunicación de los padres a la descendencia: "haz que te salgan ojos", se dice por él, "que probablemente van a resultar útiles; y mejor será que lleves hemoglobina en las venas, pues el monóxido de carbono es raro y el oxígeno abundante". En cuanto tal canal, tiene una capacidad de comunicación finita, que podemos llamar Q; si se la emplea en forma directa, el volumen de regulación utilizable por el organismo para defenderse del medio no puede exceder de Q (debido a la ley de la variedad necesaria): es un límite al que han de acomodarse los organismos incapaces de aprender; si, por el contrario, la regulación se lleva

a cabo indirectamente, el volumen *Q*, bien aprovechado, puede permitir que el organismo consiga frente al medio un volumen de regulación muy superior a *Q*; de modo que los organismos que aprenden ya no se encuentran coartados por tal límite.

Esta capacidad de "amplificación" es perfectamente conocida en otras esferas: si un niño quiere averiguar el significado de muchas palabras españolas y su padre dispone sólo de diez minutos para instruirle, se pueden seguir dos modos posibles de acción: uno consiste en emplear los diez minutos en explicar al niño los significados de todas las palabras que se pueda sin exceder tal intervalo (es evidente que por este método directo existe un límite en cuanto al número de palabras así aclarables); el método indirecto reside en emplear los diez minutos en enseñar al niño cómo se utiliza un diccionario: al terminarse el plazo, la criatura se encuentra, en cierto sentido, igual que antes, puesto que su vocabulario no habrá aumentado en una sola palabra; ello no obstante, tiene una ventaja fundamental, pues en el futuro el número de palabras que podrá entender ya no estará acotado por el límite que forman los diez minutos. La razón [de esta diferencia] consiste en que si la información sobre los significados tiene que pasar directamente por su padre, está limitada a lo que puedan dar de sí los diez minutos, mientras que en el método indirecto llega en parte por medio del padre y en parte a través de otro canal (el diccionario), que la actuación de aquél ha hecho accesible.

De análoga manera, al determinar el crecimiento del animal capaz de aprender, la configuración de genes emplea parte de sus recursos en formar un cerebro que se adapte no solamente en virtud de los pormenores de esa misma configuración, sino también merced a los del medio (éste actúa como lo hacía el diccionario). En tanto que la avispa cazadora está guiada pormenorizadamente, en su ataque a la presa, por su patrimonio genético, lo que enseña al gatito cómo cazar ratones son éstos mismos. Así pues, en el organismo que aprende, la información que le llega procedente de la configuración de genes se encuentra enormemente *complementada* por la que proporciona el medio, de forma que, después de aprender el total de la adaptación posible, puede exceder con mucho al volumen de ella transmitido directamente a través de tal configuración.

Resumen

El hecho primario consiste en que *todos* los sistemas aislados determinados por estados son selectivos: cualquiera que sea el estado que tuvieren inicialmente, se encaminan siempre hacia estados de equilibrio. Y éstos se caracterizan, en su relación con las leyes del sistema que iduzcan a efectuar cambios, por ser *excepcionalmente resistentes.*

(Calificamos de este modo las formas cuya aparición conduzca, mediante el método que sea, a la de réplicas de ellas mismas; esto es, las formas que, como se suele decir, "se reproducen".)

Si el sistema permite la formación de equilibrios locales, éstos se presentan como subsistemas dinámicos excepcionalmente resistentes a los efectos disruptores de los acontecimientos locales.

Cuando se estudian internamente estos subsistemas se encuentra que constan de partes *coordinadas* en su defensa frente a las perturbaciones.

Si éstas son de distinta clase en cada generación, pero pertenecen a una sola en cada una de ellas, las formas que nazcan con un mecanismo tal que el *medio* actúe sobre él de manera reguladora frente a cada medio concreto (los organismos que "aprenden") son todavía más resistentes.

En la presente obra nos hemos ocupado principalmente de este último estado de semejante proceso; hemos hecho ver, fijándonos en casos especialmente claros y sencillos, que la configuración de genes puede proporcionar un mecanismo (dotado de partes básicas y auxiliares) tal que, cuando actúe sobre él un medio concreto, tienda inevitablemente a adaptarse a éste.

Apéndice

El sistema determinado por estados

19/1. El aparato matemático necesario para el estudio de la adaptación no consiste simplemente en el involucrado en la solución de un problema matemático concreto: la cuestión que se presenta al biólogo matemático abarca desde la identificación de la lógica básica precisa para representar el fundamental concepto de mecanismo hasta el eventual empleo de técnicas especializadas para los problemas concretos especiales, pasando por el desarrollo de aquella lógica en diversas ramas (así, desde la discreta hasta la continua y desde las amétricas hasta las métricas).

Puesto que los problemas que interesan al biólogo suelen proceder de sistemas de enorme complejidad, en los que es imposible contar con *todos* los hechos, tiene que concederse una importancia especial a los métodos que, como ocurre con los topológicos, permiten responder de modo sencillo a cuestiones sencillas, aun cuando los hechos en que se basen sean muy complejos. Por consiguiente, los fundamentos matemáticos han de ser lo suficientemente generales para permitir que nos especialicemos en los métodos de la topología. A este respecto nos ha sido de gran ayuda la espléndida obra de la escuela francesa que escribe colectivamente bajo el pseudónimo de N. Bourbaki: los magníficos *Eléments de Mathématiques* de esta escuela han hecho ver que es posible ampliar y desarrollar una forma básica sencilla de la teoría de conjuntos, sin la menor pérdida de precisión ni el más pequeño cambio de conceptos fundamentales, hasta cubrir los campos de la topología, el álgebra, la geometría, la teoría de funciones, las ecuaciones diferenciales y todas las distintas ramas de las matemáticas.

En la Parte I de *I. to C.*, hemos puesto ya de manifiesto que la teoría de conjuntos proporciona, en especial en la forma utilizada por Bourbaki, una base segura para la lógica de mecanismos. (En realidad, en aquella obra no se emplean explícitamente los símbolos bourbakianos, pero se aprovechan sus conceptos sin cesar y conservándolos exactamente en su forma original, de modo que el lector que quiera relacionar *I. to C.* con la obra de Bourbaki observará que la correspon-

dencia entre ambas es, en la mayoría de los casos, completamente palmaria.)

Lógica de mecanismos

19/2. Empleamos como punto de partida la idea (que tiene mucho más de un siglo de vida) de que una "máquina" es aquello que, siempre que se encuentre en condiciones dadas y en un estado interno dado, va a parar a un estado determinado (es decir, que no acaba en estados distintos en distintas ocasiones). Es patente la correspondencia formal de esta definición con la "ley algebraica de composición externa", de Bourbaki: pues si las condiciones externas pueden ser cualesquiera de un conjunto de ellas, Ω, y los estados de la máquina pueden ser cualesquiera de un conjunto de estados, E, el comportamiento de la máquina define una aplicación, coordinación o representación [*mapping*] (la "*application*", de Bourbaki), de $\Omega \times E$ sobre E; así pues, el concepto de "máquina" corresponde exactamente a uno de los conceptos más básicos de las matemáticas.

De esta identificación fundamental se siguen inmediatamente otras muchas. La aplicación de E sobre sí mismo que se obtiene manteniendo Ω constante corresponde a la máquina aislada; un elemento de E que permanezca constante en el álgebra, para un valor de Ω, corresponde a un estado de equilibrio de la máquina cuando exista constancia de la entrada (o de las condiciones circundantes); esto es, cuando nos mantengamos en un campo dado; la compatibilidad (o incompatibilidad) de una relación de equivalencia con una ley externa de composición corresponde a la posibilidad (o imposibilidad) de que una simplificación que propongamos de un sistema determinado por estados permita llegar a otro sistema asimismo determinado por estados (en caso de que sea posible tal cosa, la ley algebraica de división corresponderá a la nueva y simplificada representación canónica). Y así sucesivamente, en una forma que merece que se ocupe uno de ella con toda amplitud.

No tengo la intención de estudiar este asunto *ab initio* y a fondo: como el presente libro se ocupa primordialmente del cerebro y de otros sistemas en los que es corriente la continuidad, sólo necesitamos darnos cuenta de que Bourbaki ha mostrado que es posible especializar los conceptos básicos, enunciados en forma discreta, de modo que sean aplicables a las formas continuas y a las dotadas de una métrica. Y en el presente Apéndice vamos a tratar únicamente de formas continuas y provistas de una métrica.

(Nota. A lo largo de todo este capítulo nos referiremos, sobre todo, al sistema aislado y abandonado a sí mismo, a salvo de interferencias ocasionales provinentes del experimentador, para que pueda verse lo que hace; y es preciso interpretar los enunciados que formularemos de acuerdo con esta circunstancia. En el Capítulo XXI nos ocuparemos explícitamente del sistema sometido a cambios de sus condiciones o de su entrada.)

19/3. Una **variable** es una función del tiempo. Ordinariamente representaremos un **sistema** de n variables por $x_1, x_2, \ldots, x_n$, o, a veces, más brevemente, por x. No excluiremos el caso en que $n = 1$, y, por otra parte, vamos a suponer siempre que n es finito: reemplazaremos todo sistema con un número infinito de variables (por ejemplo, el del apartado 19/17) por otro en que i sea discontinua y n finito, y que difiera del primero en una cantidad despreciable.

Una variable cualquiera, x_i, es una función del tiempo, y, por ello, cuando queramos subrayar este carácter la escribiremos $x(t)$; ha de ser uniforme, pero no es necesario que sea continua. Podemos considerar toda constante como una variable que experimente un cambio nulo.

19/4. El **estado** de un sistema en el instante t es el conjunto de valores numéricos de $x_1(t), \ldots, x_n(t)$. Dos estados, $(x_1, \ldots, x_n)$ e $(y_1, \ldots, y_n)$, son **iguales** si $x_i = y_i$ para toda i.

19/5. Sólo se puede especificar un **transición** después de haber especificado un intervalo temporal, ya sea finito y representado por Δt, ya infinitesimal y representado por dt; en cuanto a la transición misma, queda representada por un par de estados, uno de ellos en el instante t y el otro tras haber transcurrido el intervalo especificado.

Para especificar una **línea de comportamiento** es preciso dar una sucesión de estados y los intervalos temporales que medien entre ellos; dos líneas de comportamiento son **iguales** si son iguales los estados correspondientes y los intervalos que compongan la sucesión. (Por tanto, dos líneas de comportamiento que difieran solamente en los instantes absolutos de sus estados iniciales son iguales.)

19/6. Una **operación primaria** es un acontecimiento físico (y no matemático), que necesita una máquina y un experimentador (u observador) reales; éste elige un estado inicial $(x^0_1, \ldots, x^0_n)$ y registra luego la transición que se produce al cambiar el sistema siguiendo sus propias tendencias y leyes internas.

19/7. Si al aplicar reiteradamente operaciones primarias se encuentra que todas las líneas de comportamiento que sigan a un estado inicial, E, son iguales, y si se observa una igualdad análoga tras cualesquiera otros estados, E', E'', ..., el sistema es **regular.**

Podemos representar semejante sistema por ecuaciones de la forma

$$x_1 = F_1(x_1^0, \ldots, x_n^0; t)$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots$$
$$x_n = F_n(x_1^0, \ldots, x_n^0; t)$$

en las que F sean funciones uniformes de sus argumentos (pero no sometidas a ninguna otra restricción). Es evidente que si el estado inicial corresponde a $t = 0$, hemos de tener

$$F_i(x_1^0, \ldots, x_n^0; 0) = x_i^0 \qquad (i = 1, \ldots, n).$$

19/8. Teorema. *Las líneas de comportamiento de un sistema determinado por estados definen un grupo.*

Sea x^0 el estado inicial de las variables (representamos, pues, con este solo símbolo las n) y permitamos que transcurra el tiempo t', con lo que x^0 pasará a ser x'; luego, tomando este último estado como inicial, dejemos transcurrir el tiempo t'', tras el cual x' se habrá cambiado en x''. Como el sistema está determinado por estados, si hubiese partido de x^0 y se hubiera dejado transcurrir el tiempo $t' + t''$, habría recorrido idéntica línea total de comportamiento; luego

$$x''_i = F_i(x'_1, \ldots, x'_n; t'') = F_i(x_1^0, \ldots, x_n^0; t' + t'')$$
$$(i = 1, \ldots, n).$$

Pero

$$x'_i = F_i(x_n^0, \ldots, x_n^0; t') \qquad (i = 1, \ldots, n);$$

por lo cual

$$F_i\{F_1(x^0; t'), \ldots, F_n(x^0; t'); t''\} = F_i(x_1^0, \ldots, x_n^0; t' + t'')$$
$$(i = 1, \ldots, n);$$

para todos los valores de x^0, t' y t'' dentro de una región dada; y este es un modo de definir un grupo continuo con un parámetro finito.

La inversa no es cierta: así, $x = (1 + t)x^0$ define un grupo (siendo $n = 1$), pero los tiempos no se combinan aditivamente, y el sistema no está determinado por estados.

Ejemplo: El sistema cuyas líneas de comportamiento se encuentren dadas por

$$x_1 = x^0_1 + x^0_2 t + t^2$$
$$x_2 = x^0_2 + 2t;$$

está determinado por estados, en tanto que aquél cuyas líneas respondan a

$$x_1 = x^0_1 + x^0_2 t + t^2$$
$$x_2 = x^0_2 + t;$$

no lo está.

La representación canónica

19/9. Teorema. *Para que un sistema,* $x_1, \ldots, x_n$ *esté determinado por estados, es necesario y suficiente que las* x, *como funciones de* t, *satisfagan las ecuaciones*

$$\left.\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= f_1(x_1, \ldots, x_n) \\ &\cdot\ \cdot \\ \frac{dx_n}{dt} &= f_n(x_1, \ldots, x_n) \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

siendo las f *funciones uniformes, pero no necesariamente continuas, de sus argumentos; dicho de otro modo, que las fluxiones* * *del conjunto* $x_1, \ldots, x_n$ *puedan especificarse como funciones de este conjunto y de ningunas otras funciones del tiempo, ni explícitas ni implícitas. Cuando estas ecuaciones se presentan en tal forma se dice que constituyen la* **representación canónica** *del sistema.*

(A veces estas ecuaciones se escriben

$$dx_i/dt = f_i(x_1, \ldots, x_n) \qquad (i = 1, \ldots, n). \qquad (2)$$

e incluso pueden abreviarse en $\dot{x} = f(x)$ cuando el contexto aclare su significado.)

1) Supongamos que el sistema esté determinado por estados. Se lo hace partir de $x^0_1, \ldots, x^0_n$ en el instante $t = 0$, se deja que pase a $x_1, \ldots, x_n$ al cabo del tiempo t, y que luego, en el instante $t + dt$, lle-

* El autor emplea el término newtoniano, hoy rara vez usado, para lo que normalmente llamaríamos derivados con respecto al tiempo. (*N. del T.*)

gue a $x_1 + dx_1$, ..., $x_n + dx_n$; también se lo hace partir de x_1, ..., x_n en el instante $t = 0$ y se permite que transcurra el tiempo dt; en virtud de la propiedad de grupo (apartado 19/8), los dos estados finales deben ser iguales. Si empleamos la misma notación que en 19/8, tenemos que, tras partir de $x^0{}_i$, x_i pasa a $F_i\ (x^0;\ t + dt)$, y que tras partir de x_i llega a $F_i\ (x;\ dt)$; por consiguiente,

$$F_i\ (x^0;\ t + dt) = F_i\ (x;\ dt) \qquad (i = 1,\ \ldots,\ n).$$

Desarróllese por la fórmula de Taylor y escríbase $\frac{\partial}{\partial b} F_i\ (a;\ b)$ en la forma $F'_i\ (a;\ b)$; entonces,

$$F_i\ (x^0;\ t) + dt\,.\,F'_i\ (x^0;\ t) = F_i\ (x;\ 0) + dt\,.\,F'_i\ (x;\ 0)$$
$$(i = 1,\ \ldots,\ n).$$

Pero tanto $F_i\ (x^0;\ t)$ como $F_i\ (x;\ 0)$ son iguales a x_i.

Por consiguiente,

$$F'_i\ (x^0;\ t) = F'_i\ (x;\ 0) \qquad (i = 1,\ \ldots,\ n) \tag{3}$$

Mas

$$x_i = F_i\ (x^0;\ t) \qquad (i = 1,\ \ldots,\ n)$$

luego

$$\frac{dx_i}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} F_i\ (x^0;\ t) = F'_i\ (x^0;\ t)$$

de modo que, en virtud de (3),

$$\frac{dx_i}{dt} = F'_i\ (x;\ 0) \qquad (i = 1,\ \ldots,\ n);$$

con lo que se demuestra el teorema, ya que $F'_i\ (x;\ 0)$ no contiene a t más que en x_1, ..., x_n, y no en ninguna otra forma explícita ni implícita.

Ejemplo 1. Cuando se opera de este modo sobre el sistema determinado por estados del apartado 19/8, se obtienen las siguientes ecuaciones diferenciales en forma canónica:

$$\left.\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= x_2 \\ \frac{dx_2}{dt} &= 2 \end{aligned}\right\}$$

En cambio, no se pueden aplicar estas operaciones al segundo sistema de dicho apartado, ya que no está determinado por estados y no se cumple la propiedad de grupo.

Corolario:

$$f_i(x_1, \ldots, x_n) \equiv \left[\frac{\partial}{\partial t} F_i(x_1, \ldots, x_n; t)\right]_{t=0} \quad (i = 1, \ldots, n)$$

2) Dadas las ecuaciones diferenciales [del teorema], se las puede escribir:

$$dx_i = f_i(x_1, \ldots, x_n) \cdot dt \qquad (i = 1, \ldots, n)$$

lo cual hace patente que un conjunto dado de valores de $x_1, \ldots, x_n$ (esto es, un estado dado del sistema) especifica completamente el cambio, dx_i, que experimentará cada variable, x_i, durante el intervalo temporal que siga, dt. Por integración queda definida la línea de comportamiento a partir de aquel estado, luego el sistema está determinado por estados.

Ejemplo 2. Integrando

$$\left.\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= x_2 \\ \frac{dx_2}{dt} &= 2 \end{aligned}\right\}$$

llegamos de nuevo a las ecuaciones de grupo del ejemplo de 19/8.

19/10. *Definición.* El sistema es **lineal** cuando todas las $f_1, \ldots, f_n$ son funciones lineales de los argumentos $x_1, \ldots, x_n$.

19/11. *Ejemplo* 3. Podemos obtener las ecuaciones del homeóstato del siguiente modo: si x_i es el ángulo de desviación de imán i-ésimo con respecto a su orientación central, las fuerzas que actúan sobre x_i son: el momento [de giro], que es proporcional a $\dot{x}_i$; la fricción, asimismo proporcional a $\dot{x}_i$, y las cuatro corrientes que pasan por el devanado, que son proporcionales a x_1, x_2, x_3 y x_4. Asumiendo la hipótesis de linealidad, y que las cuatro unidades sean constructivamente idénticas, tenemos:

$$\frac{d}{dt}(m\dot{x}_i) = -k\dot{x}_i + l(p - q)(a_{i1}x_1 + \ldots + a_{i4}x_4)$$

$$(i = 1, 2, 3, 4)$$

siendo p y q los potenciales en los extremos del canalón, l un coeficiente que depende de la válvula, k otro que depende del rozamiento del molinete, y m un tercero que depende del momento de inercia del imán. Si hacemos $h = l(p-q)/m$ y $j = k/m$, estas ecuaciones pueden escribirse:

$$\left.\begin{aligned} dx_i/dt &= \dot{x}_i \\ d\dot{x}_i/dt &= h(a_{i1}x_1 + \dots + a_{i4}x_4) - j\dot{x}_i \end{aligned}\right\} \qquad (i = 1, 2, 3, 4)$$

lo cual muestra que este sistema de 8 variables está determinado por estados y es lineal.

Podemos escribirlas también del siguiente modo:

$$\left.\begin{aligned} \frac{dx_i}{dt} &= \dot{x}_i \\ \frac{d\dot{x}_i}{dt} &= \frac{k}{m}\left\{\frac{l(p-q)}{k}(a_{i1}x_1 + \dots + a_{i4}x_4) - \dot{x}_i\right\} \end{aligned}\right\} \quad (i = 1, 2, 3, 4)$$

Supongamos ahora que $m \to 0$; $d\dot{x}_i/dt$ se hace muy grande, pero no ocurre así con dx_i/dt; por tanto, $\dot{x}_i$ tiende rápidamente hacia

$$\frac{l(p-q)}{k}(a_{i1}x_1 + \dots + a_{i4}x_4)$$

en tanto que las x, que varían lentamente, no pueden modificar con rapidez el valor hacia el que tiende $\dot{x}_i$; y, en el límite

$$\frac{dx_i}{dt} = \dot{x}_i = \frac{l(p-q)}{k}(a_{i1}x_1 + \dots + a_{i4}x_4) \qquad (i = 1, 2, 3, 4)$$

Hagamos un cambio de escala temporal, mediante la transformación $\tau = \frac{l(p-q)}{k}\,t$; entonces,

$$dx_i/d\tau = a_{i1}x_1 + \dots + a_{i4}x_4 \qquad (i = 1, 2, 3, 4)$$

lo cual demuestra que el sistema x_1, x_2, x_3, x_4 está determinado por estados y es lineal. Las a son ahora los valores fijados por los mandos de entrada de la figura 8/2/3.

19/12. Los teoremas de los apartados precedentes hacen ver que las propiedades que vamos a enumerar a continuación son equivalentes,

en cuanto que la posesión de una cualquiera de ellas implica la de las demás.

1) El sistema está determinado por estados.

2) Por un punto cualquiera del campo pasa una sola línea de comportamiento.

3) Las líneas de comportamiento están especificadas por ecuaciones de la forma

$$dx_i/dt = f_i\,(x_1, \ldots, x_n) \qquad (i = 1, \ldots, n)$$

en las que el segundo miembro no contiene otras funciones de t que aquellas cuyas fluxiones se encuentran en el primero.

19/13. Tenemos un ejemplo sencillo de un sistema regular pero no determinado por estados en el siguiente dispositivo. Se modifica el tablero de una mesa de suerte que, en lugar de ser una superficie plana,

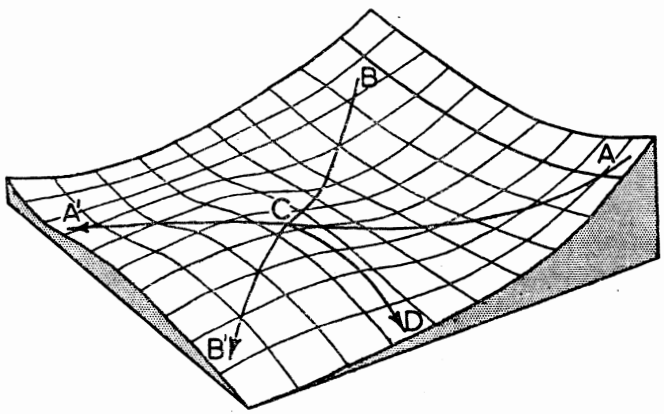


FIGURA 19/13/1

ondule irregular pero suavemente, como un campo de golf (figura 19/13/1); mirándolo desde arriba podemos trazar una cuadrícula que nos sirva para situar las coordenadas de sus puntos; si ahora colocamos una bola en un punto cualquiera y la abandonamos a sí misma, se pondrá a rodar, y si marcamos su posición cada décima de segundo, digamos, podremos determinar las líneas de comportamiento del sistema de dos variables constituído por las dos coordenadas a que atendemos.

Si el relieve está bien hecho, las líneas de comportamiento serán

reproducibles con exactitud, y el sistema será regular; mas si el experimentador ignora todas las cuestiones referentes a fuerzas, gravedad y momentos, este sistema no puede satisfacerle; pues encontraría que cuando coloca la bola en A va a parar siempre a A', y que cuando la abandona en B termina siempre en B', de modo que su comportamiento en C sería difícil de explicar (y si quisiese aclarar la situación colocando inicialmente la bola en C vería que se desplaza a D). El experimentador diría, pues, que no puede hacer carrera de este sistema, ya que, si bien cada línea de comportamiento puede reproducirse exactamente, no existe una relación sencilla entre las distintas líneas; rechazaría, en consecuencia, este sistema de dos variables y no descansaría hasta haber descubierto, ya fuese por sí mismo o en seguimiento de Newton, un sistema que *esté* determinado por estados. En mi teoría yo reclamo insistentemente sistemas determinados por estados porque me acomodo a lo que pide el experimentador, que es igualmente insistente en su labor práctica.

Transformaciones de la representación canónica

19/14. A veces se opera con sistemas que (según se sabe) están aislados y son completos, mediante algún método no idéntico al que hemos empleado aquí. En tales casos puede ser necesario efectuar alguna manipulación que convierta la otra forma en la nuestra; y vamos a ver algunas de las manipulaciones posibles en los próximos apartados.

19/15. En ocasiones los sistemas pueden describirse mejor después de haber llevado a cabo un cambio de coordenadas; esto quiere decir que se pasa de las variables iniciales, $x_1, \ldots, x_n$, a un nuevo conjunto de ellas, $y_1, \ldots, y_n$, en igual número que las primeras y que estén relacionadas con ellas mediante las funciones *uniformes* ϕ_i:

$$y_i = \phi_i (x_i, \ldots, x_n) \qquad (i = 1, \ldots, n)$$

Si imaginamos que las variables se representan en escalas graduadas o esferas, este cambio quiere decir que se pasa a un nuevo conjunto de esferas indicadoras, en que cada una de las cuales se hace visible una función de las antiguas. Y si las funciones ϕ_i no varían con el tiempo (en cuanto funciones de sus argumentos), el nuevo sistema permanecerá determinado por estados.

19/16. En el ejemplo del "homeóstato" que hemos presentado en el apartado 19/11 tratábamos una fluxión como si fuese una variable independiente; he observado que este modo de operar suele presentar varias ventajas, pues no da lugar a ninguna dificultad ni incompatibilidad y permite una elegante uniformidad de método.

Por ejemplo, si tenemos las ecuaciones de un sistema determinado por estados, podemos escribirlas del modo siguiente:

$$\dot{x}_i - f_i\,(x_1, \ldots, x_n) = 0 \qquad (i = 1, \ldots, n)$$

y tratarlas como n ecuaciones de 2 n variables algebraicamente independientes, $x_1, \ldots, x_n, \dot{x}_1, \ldots, \dot{x}_n$. Diferenciemos ahora todas las ecuaciones q veces, con lo que llegaremos a $(q+1)n$ ecuaciones con $(q+2)n$ variables y derivadas; ahora podemos elegir arbitrariamente n de estas variables y, dándonos cuenta de que precisamos también las derivadas de orden inmediatamente superior de ellas, eliminar las demás qn variables, que utilizaban qn ecuaciones. Suponiendo que las variables elegidas hayan sido $z_1, \ldots, z_n$, tendremos n ecuaciones en $2n$ variables, del tipo

$$\Phi_i\,(z_1, \ldots, z_n, \dot{z}_1, \ldots, \dot{z}_n) = 0 \qquad (i = 1, \ldots, n);$$

en las que las z son las x elegidas y las $\dot{z}$ las $\dot{x}$ correspondientes; basta ahora resolver estas ecuaciones, hallando las $\dot{z}_1, \ldots, \dot{z}_n$ en función de las $z_1, \ldots, z_n$, para que se tengan en forma canónica; así pues, el nuevo sistema está asimismo determinado por estados (en virtud de 19/9).

Esta transformación implica que *en un sistema determinado por estados podemos evitar una referencia directa a algunas de las variables con tal de que empleemos derivadas de las demás variables en lugar suyo.*

Ejemplo:

$$\left.\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_1 - x_2 \\ \dot{x}_2 &= 3\,x_1 + x_2 \end{aligned}\right\}$$

puede modificarse de modo que se omita toda referencia directa a x_2, sin más que emplear como nueva variable $\dot{x}_1$; de este modo se convierte con facilidad en

$$\left.\begin{aligned} dx_1/dt &= \dot{x}_1 \\ d\dot{x}_1/dt &= -4\,x_1 + 2\,\dot{x}_1 \end{aligned}\right\}$$

que tiene la forma canónica en las variables x_1 y $\dot{x}_1$.

19/17. Podemos hacer que estén determinados por estados los sistemas aislados en los que se transmitan efectos de una variable a otra con cierta demora finita: basta añadir derivadas que funcionen como nuevas variables. Así, si el efecto de x_1 invierte 2 unidades de tiempo en llegar a x_2, en tanto que el de x_2 tarda 1 unidad en alcanzar a x_1, y si escribimos estas variables en la forma $x(t)$ para hacer ver la dependencia funcional,

$$\left.\begin{aligned} dx_1(t)/dt &= f_1\{x_1(t), x_2(t-2)\} \\ dx_2(t)/dt &= f_2\{x_1(t-1), x_2(t)\} \end{aligned}\right\}$$

Esta forma no es canónica; mas desarrollando $x_1(t-1)$ y $x_2(t-2)$ por la fórmula de Taylor y añadiendo al sistema cuantas derivadas sean necesarias para conseguir la exactitud que se requiera, podemos llegar a un sistema determinado por estados que se aproxime al dado tanto como queramos.

19/18. Si una variable depende de un efecto acumulativo tal que, por ejemplo, $\dot{x}_1 = f\{\int_a^t \phi(x_2)\,dt\}$, si hacemos $\int_a^t \phi(x_2)\,dt = y$, llegamos a la forma equivalente

$$\begin{aligned} dx_1/dt &= f(y) \\ dy/dt &= \phi(x_2) \\ dx_2/dt &= \ldots \text{ etc.}, \end{aligned}$$

que es una forma canónica.

19/19. Si una variable depende de unos efectos de velocidad, como podrían ser los correspondientes a

$$\frac{dx_1}{dt} = f_1\left(\frac{dx_2}{dt}, x_1, x_2\right)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = f_2(x_1, x_2)$$

y si substituímos el valor de $\frac{dx_2}{dt}$ en $f_1(\ldots)$, conseguimos llegar a la forma canónica

$$\left.\begin{aligned} dx_1/dt &= f_1\{f_2(x_1, x_2), x_1, x_2\} \\ dx_2/dt &= f_2(x_1, x_2). \end{aligned}\right\}$$

19/20. Si una variable cambia instantáneamente (o con la suficiente rapidez para que pueda considerarse que lo hace así sin error grave),

pueden darse sus valores como función de los de las demás variables, y, por consiguiente, se la puede eliminar del sistema.

19/21. Rara vez precisaremos en nuestro estudio unas soluciones explícitas de las ecuaciones canónicas

$$dx_i/dt = f_i\,(x_1, \ldots, x_n) \qquad (i = 1, \ldots, n);$$

pero vamos a exponer algunos métodos de hacerlo, ya que tendremos necesidad de ellas en los ejemplos.

1) Llegamos a una solución simbólica sencilla, que da los primeros términos de x en serie de potencias de t, mediante

$$x_i = e^{tX}\, x_1^0 \qquad (i = 1, \ldots, n) \tag{1}$$

siendo X el operador:

$$f_1(x_1^0, \ldots, x_n^0)\,\frac{\partial}{\partial x_1^0} + \ldots + f_n(x_1^0, \ldots, x_n^0)\,\frac{\partial}{\partial x_n^0} \tag{2}$$

y

$$e^{tX} = 1 + tX + \frac{t^2}{2!}\,X^2 + \frac{t^3}{3!}\,X^3 + \ldots \tag{3}$$

Esta solución tiene la importante propiedad de que cualquier función $\Phi\,(x_1, \ldots, x_n)$ puede expresarse como función de t, si las x parten de $x^\circ, \ldots, x_n^\circ$, valiéndose de

$$\Phi\,(x_1, \ldots, x_n) = e^{tX}\,\Phi\,(x_1^\circ, \ldots, x_n^\circ). \tag{4}$$

2) Si las funciones f_i son lineales, de modo que se tengan

$$\left.\begin{aligned} dx_1/dt &= a_{11}\,x_1 + a_{12}\,x_2 + \ldots + a_{1n}\,x_n + b_1 \\ &\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\ dx_n/dt &= a_{n1}\,x_1 + a_{n2}\,x_2 + \ldots + a_{nn}\,x_n + b_n \end{aligned}\right\} \tag{5}$$

y si las b valen cero (lo cual puede conseguirse por un cambio de origen), las ecuaciones pueden escribirse en forma matricial así:

$$\dot{x} = Ax; \tag{6}$$

siendo $\dot{x}$ y x vectores columna y A la matriz cuadrada $[a_{ij}]$. La solución, también en forma matricial, se puede escribir:

$$\dot{x} = e^{tA}\,x^0. \tag{7}$$

3) Para resolver las formas lineales ofrece las máximas ventajas el método, recientemente desarrollado, de la transformación de Laplace, cuyos pormenores pueden estudiarse en los tratados corrientes.

19/22. Es preciso proceder con cautela antes de comparar los sistemas determinados por estados con otros tipos de sistemas empleados en física y en termodinámica: así, es menester darse cuenta de que el concepto de aquel sistema no hace referencia ni a la energía ni a su conservación (todo lo cual se considera cosa ajena al caso). Debe advertirse, asimismo, que este género de sistema es esencialmente irreversible, cualquiera que sea la "máquina" que dé lugar a él, según puede comprobarse, bien sea examinando la representación del comportamiento del apartado 19/7, la representación canónica del 19/9 o, en un caso particular, estudiando el campo del péndulo ordinario, que presentábamos en la figura 2/15/1.

La estabilidad

20/1. Como veremos en el apartado 21/14, la representación canónica contiene *toda* la información que puede proporcionar la "máquina" real acerca del sistema que se haya elegido; ahora bien, por el mismo hecho de efectuar esta elección de un sistema determinado, el experimentador reconoce que sólo puede obtener una cantidad de información finita a partir del infinito volumen de ella que existe en la "máquina" real; pero incluso esta reducción es con frecuencia insuficiente, ya que la representación canónica de las propiedades de comportamiento de $x_1, \ldots, x_n$ puede aportar un volumen de información absolutamente inmanejable, por su tamaño. Tomemos el caso, por ejemplo, de una aglomeración de 20.000 estrellas, acerca del cual pregunte el astrónomo si se condensará en una bola o se dispersará; *es posible* preparar la representación canónica pertinente (con 120.000 variables), que llevará en sí la respuesta; pero la labor de extraer ésta tiene una magnitud que llega a lo prohibitivo, y por ello los astrónomos — lo mismo que hacen otras personas en situaciones análogas — han buscado mé todos que no utilicen toda la información disponible en la representación canónica. De aquí la introducción en la ciencia de métodos estadísticos y topológicos, y el empleo de conceptos tales como el de independencia (cf. 12/4), que nos permiten, *si el caso es apropiado*, lograr una respuesta sencilla a una pregunta sencilla sin necesidad de que pasemos a considerar todos los detalles.

Un concepto muy destacado de esta índole es el de estabilidad. Hemos presentado sus elementos básicos en *I.* to C., capítulo V; aquí nos ocuparemos de él únicamente en la forma que es oportuna para los sistemas continuos, y sólo con el rigor que sea necesario para nuestro propósito principal.

20/2. Dado un sistema determinado por estados y en condiciones invariables, de modo que tenga un campo, y dados una región de éste y un punto en tal región, se dice que una línea de comportamiento que

pase por tal punto es **estable** (con respecto a tales campo, región y punto) si no abandona dicha región.

20/3. Si todas las líneas dentro de una región dada son estables a partir de todos los puntos de ésta, y si todas las líneas se encuentran en un punto, el sistema tiene estabilidad **normal.**

20/4. Podemos definir el **estado de equilibrio** de varios modos distintos: en el campo, es un punto terminal de una línea de comportamiento; en las ecuaciones del apartado 19/7, el estado de equilibrio $X_1, \ldots, X_n$ está dado por las ecuaciones

$$X_i = \lim_{t \to \infty} F_i\,(x^0; t) \qquad (i = 1, \ldots, n) \tag{1}$$

(si existen los n límites); en las ecuaciones canónicas, los valores satisfacen

$$f_i\,(X_1, \ldots, X_n) = 0 \qquad (i = 1, \ldots, n). \tag{2}$$

Un estado de equilibrio es un invariante del grupo, ya que un cambio de t no altera su valor.

Si el jacobiano de las F, esto es, el determinante $\left|\frac{\partial f_i}{\partial x_j}\right|$ (que simbolizaremos por J), no es idénticamente nulo, habrá estados de equilibrio aislados; si $J \equiv 0$, pero no todos sus primeros menores son cero, las ecuaciones definen una curva tal que todos y cada uno de sus puntos corresponden a estados de equilibrio; si $J \equiv 0$ y todos sus primeros menores son cero, pero no lo son todos los segundos, existe una superficie de dos hojas compuestas de estados de equilibrio; y así sucesivamente.

20/5. Teorema. *Si las* f *son continuas y diferenciables, todo sistema determinado por estados tiende a la forma lineal* (cf. 19/10) *en las proximidades de un estado de equilibrio.*

Supongamos que el sistema, especificado por

$$dx_i/dt = f_i\,(x_1, \ldots, x_n) \qquad (i = 1, \ldots, n)$$

tenga un estado de equilibrio, $X_1, \ldots, X_n$, tal que

$$f_i\,(X_1, \ldots, X_n) = 0 \qquad (i = 1, \ldots, n)$$

Hagamos que $x_i = X_i + \xi_i$ $(i = 1, \ldots, n)$, de modo que x_j se mida

por su discrepancia, ξ_i, con respecto al valor del equilibrio; entonces,

$$\frac{d}{dt}(X_i + \xi_i) = f_i\,(X_1 + \xi_1 \ \ldots,\ X_n + \xi_n) \qquad (i = 1,\ \ldots,\ n).$$

Desarrollando el segundo miembro por la fórmula de Taylor y advirtiendo que $dX_i/dt = 0$ y que $f_i\,(X) = 0$, hallamos que, si las ξ son infinitesimales,

$$\frac{d\,\xi_i}{dt} = \frac{\partial f_i}{\partial \xi_1}\,\xi_1 + \ldots + \frac{\partial f_i}{\partial \xi_n}\,\xi_n \qquad (i = 1,\ \ldots,\ n).$$

Así pues, las derivadas parciales en el punto X_1, ..., X_n son constantes numéricas; luego el sistema es lineal.

20/6. En general, el único criterio de estabilidad consiste en observar o calcular la línea de comportamiento dada y ver lo que ocurre cuando $t \to \infty$. Sin embargo, para el caso de sistemas lineales existen criterios que no involucran explícitamente la línea de comportamiento; y como, según el apartado anterior, muchos sistemas se aproximan a los lineales dentro de la región que nos interesa, los métodos que vamos a describir son aplicables en muchas ocasiones.

Supongamos que el sistema lineal sea

$$dx_i/dt = a_{i1}\,x_1 + a_{i2}\,x_2 + \ldots + a_{in}\,x_n \qquad (i = 1,\ \ldots,\ n) \tag{1}$$

o bien, expresándolo con la concisa notación matricial (véase 19/21),

$$\dot{x} = Ax. \tag{2}$$

Los términos constantes del segundo miembro no influyen en la estabilidad, y, por tanto, pueden pasarse por alto. Si el determinante de A no es nulo, existe un único estado de equilibrio; ahora bien, cuando se desarrolla el determinante

$$\begin{vmatrix} a_{11} - \lambda & a_{12} \ldots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} - \lambda \ldots & a_{2n} \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots & & \\ a_{n1} & a_{n2} \ \ldots & a_{nn} - \lambda \end{vmatrix}$$

se obtiene un polinomio en λ de grado n que, al ser igualado a 0 (y, si es preciso, tras multiplicarlo por -1), proporciona la **ecuación característica** de la matriz A:

$$\lambda^n + m_1\,\lambda^{n-1} + m_2\,\lambda^{n-2} + \ldots + m_n = 0.$$

Cada uno de los coeficientes, m_i, es la suma de todos los menores principales (coaxiales) de i filas de A, multiplicada por $(-1)^i$; así,

$$m_1 = -(a_{11} + a_{22} + \ldots + a_{nn});\ m_n = (-1)^n |A|.$$

Ejemplo. El sistema lineal

$$\left.\begin{aligned} dx_1/dt &= -5x_1 + 4x_2 - 6x_3 \\ dx_2/dt &= 7x_1 - 6x_2 + 8x_3 \\ dx_3/dt &= -2x_1 + 4x_2 - 4x_3 \end{aligned}\right\}$$

tiene la ecuación característica

$$\lambda^3 + 15\lambda^2 + 2\lambda + 8 = 0.$$

Las raíces de esta ecuación, $\lambda_1, \ldots, \lambda_n$, son las **raíces latentes** de A. La integral de la representación canónica de cada variable como función lineal de las exponenciales $e^{\lambda_1 t}, \ldots, e^{\lambda_n t}$; para que la suma sea convergente, es preciso que las partes reales de $\lambda_1, \ldots, \lambda_n$ sean negativas, criterio que, a su vez, lo constituye de la estabilidad del sistema.

Ejemplo. La ecuación $\lambda^3 + 15\ \lambda^2 + 2\lambda + 8 = 0$ tiene por raíces $-14{,}902$ y $-0{,}049 \pm 0{,}729\ \sqrt{-1}$, luego el sistema es estable.

20/7. El criterio de Hurwitz evita tener que hallar las raíces latentes: una condición necesaria y suficiente para que el sistema lineal sea estable es que la serie de determinantes

$$m_1,\ \begin{vmatrix} m_1 & 1 \\ m_3 & m_2 \end{vmatrix},\ \begin{vmatrix} m_1 & 1 & 0 \\ m_3 & m_2 & m_1 \\ m_5 & m_4 & m_3 \end{vmatrix},\ \begin{vmatrix} m_1 & 1 & 0 & 0 \\ m_3 & m_2 & m_1 & 1 \\ m_5 & m_4 & m_3 & m_2 \\ m_7 & m_6 & m_5 & m_4 \end{vmatrix},\ \text{etc.}$$

(en la que, si $q > n$, $m_q = 0$) sea toda ella positiva.

Ejemplo: El sistema cuya ecuación característica es:

$$\lambda^3 + 15\lambda^2 + 2\lambda + 8 = 0;$$

nos proporciona la serie

$$+15,\ \begin{vmatrix} 15 & 1 \\ 8 & 2 \end{vmatrix},\ \begin{vmatrix} 15 & 1 & 0 \\ 8 & 2 & 15 \\ 0 & 0 & 8 \end{vmatrix}.$$

cuyos valores son $+15$, $+22$ y $+176$. Luego el sistema es estable, lo cual está de acuerdo con lo hallado por el criterio anterior.

20/8. Otro criterio, relacionado con el de Nyquist, afirma que un sistema lineal es estable si y sólo si la amplitud del polinomio

$$\lambda^n + m_1 \lambda^{n-1} + m_2 \lambda^{n-2} + \ldots + m_n,$$

varía en $n\pi$ cuando la variable compleja λ ($\lambda = a + b\,\iota$, siendo $\iota = \sqrt{-1}$) pasa de $-\iota\infty$ a $+\iota\infty$ a lo largo del eje de las b en el plano complejo λ.

En la teoría de circuitos eléctricos y en la de servomecanismos se emplea mucho el criterio de estabilidad de Nyquist, que, sin embargo, emplea datos obtenidos a partir de la respuesta del sistema a una perturbación armónica persistente. (Como semejante perturbación es de poca utilidad en la teoría de los sistemas que se adaptan, no trataremos aquí de ella.)

20/9. Vamos a ilustrar con algunos ejemplos diversos hechos relativos a la estabilidad de los sistemas lineales.

Ejemplo 1. Los términos diagonales, a_{ii}, representan las estabilidades intrínsecas de las variables: pues si se conservan constantes todas las variables execepto x_i, la i-ésima ecuación del sistema lineal se convierte en

$$dx_i/dt = a_{ii}\,x_i + c,$$

siendo c una constante; lo cual hace ver que en tales condiciones x_i convergerá hacia $-c/a_{ii}$ si a_{ii} es negativo, y divergerá más allá de todo límite en caso de que sea positivo.

Si los términos diagonales, a_{ii}, son de valor absoluto mucho mayor que los demás, las raíces latentes tienden a los valores de a_{ii}; de ello se sigue que si aquellos términos toman unos valores extremos, determinan la estabilidad.

Ejemplo 2. Si se dan los términos a_{ij} de las primeras $n-1$ filas (o columnas), pueden reajustarse los restantes n términos de forma que las raíces latentes tomen unos valores prefijados cualesquiera.

Ejemplo 3. La matriz de las ecuaciones del homeóstato del apartado 19/11 es:

$$\begin{bmatrix}
\cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot & \cdot \\
\cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot & \cdot \\
\cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 & \cdot \\
\cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 \\
a_{11}h & a_{12}h & a_{13}h & a_{14}h & -j & \cdot & \cdot & \cdot \\
a_{21}h & a_{22}h & a_{23}h & a_{24}h & \cdot & -j & \cdot & \cdot \\
a_{31}h & a_{32}h & a_{33}h & a_{34}h & \cdot & \cdot & -j & \cdot \\
a_{41}h & a_{42}h & a_{43}h & a_{44}h & \cdot & \cdot & \cdot & -j
\end{bmatrix}$$

Si $j = 0$, el sistema tiene que ser inestable, pues las ocho raíces latentes son las cuatro raíces latentes de $[a_{ij}]$ tomadas una vez con signo positivo y otra con negativo. Si aquella matriz tiene las raíces latentes $\mu_1, \ldots, \mu_8$, si $\lambda_1, \ldots, \lambda_4$ son las de la matriz $[a_{ij}\, h]$ y si $j \neq 0$, las λ y las μ están ligadas entre sí por la relación $\lambda_p = \mu^2{}_q + j\mu_q$; y cuando $j \to \pm\infty$, el sistema de 8 variables y el de 4 variables a que nos estamos refiriendo son o ambos estables o ambos inestables.

Ejemplo 4. En un sistema estable, al fijar una variable puede hacerse inestable el sistema formado por las restantes. Por ejemplo, el sistema de matriz

$$\begin{bmatrix} 6 & 5 & -10 \\ -4 & -3 & -1 \\ 4 & 2 & -6 \end{bmatrix}$$

es estable. Pero si se fija la tercera variable, el sistema formado por las dos primeras tiene la matriz

$$\begin{bmatrix} 6 & 5 \\ -4 & -3 \end{bmatrix}$$

y es inestable.

Ejemplo 5. Cuando se hace que una variable sea instrínsecamente más estable (ejemplo 1 de este apartado), ello puede convertir el todo en inestable. Por ejemplo, el sistema cuya matriz es

$$\begin{bmatrix} -4 & -3 \\ 3 & 2 \end{bmatrix}$$

es estable. Pero si a_{11} se hace más negativo, el sistema pasa a ser inestable (a partir de $a_{11} < -4\,\tfrac{1}{2}$).

Ejemplo 6. Supongamos que en la matriz de [orden] $n \times n$

$$\left[\begin{array}{c|c} a & b \\ \hline c & d \end{array}\right]$$

que está dividida en cajas, el orden de $[a]$ sea $k \times k$. Si los k elementos diagonales, a_{ii}, adquieren un valor absoluto mucho mayor que todos los demás, las raíces latentes de la matriz tienden a los k valores a_{ii} y a las $n - k$ raíces latentes de $[d]$. Así, la matriz

$$\begin{bmatrix} 1 & -3 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}$$

que corresponde a [*d*], tiene las raíces latentes $+1{,}5 \pm 1{,}658\iota$, y la matriz

$$\begin{bmatrix} -100 & -1 & 2 & 0 \\ -2 & -100 & -1 & 2 \\ 0 & -3 & 1 & -3 \\ 2 & -1 & 1 & 2 \end{bmatrix}$$

posee las raíces latentes $-101{,}39$, $-98{,}62$ y $+1{,}506 \pm 1{,}720\,\iota$.

Corolario. Si el sistema [*d*] es inestable, pero el sistema total de 4 variables es estable, al hacerse x_1 y x_2 más estables intrínsicamente, el todo terminará por convertirse en inestable.

Ejemplo 7. Puede verse con toda claridad la naturaleza totalista [*holistic*] de la estabilidad mediante la matriz

$$\begin{bmatrix} -3 & -2 & 2 \\ -6 & -5 & 6 \\ -5 & 2 & -4 \end{bmatrix}$$

en la que cada una de las variables, e incluso cada par de ellas, es estable; pese a lo cual el todo es inestable.

La probabilidad de la estabilidad

20/10. Sólo cabe precisar la probabilidad de que un sistema sea estable tras haber definido éste, haber definido en él la "estabilidad" y haber definido, finalmente, un espacio de muestreo apropiado. En general, el número de posibles significados de "probabilidad de la estabilidad" es demasiado grande para que le dediquemos gran espacio aquí: hay que considerar individualmente cada caso siempre que se haga menester tal estudio.

Un caso que presenta cierto interés, debido a su posición central en la teoría que nos concierne, es el de la probabilidad de que un sistema *lineal* sea estable cuando en su matriz se coloquen números procedentes de un muestreo aleatorio de unas distribuciones dadas; entonces, el problema se convierte en el que vamos a enunciar ahora:

Una matriz de orden n × n *tiene los elementos reales y extraídos por un muestreo aleatorio de unas distribuciones dadas; hállese la probabilidad de que todas las raíces latentes tengan la parte real negativa.*

Al parecer, este problema no se ha resuelto todavía, ni siquiera en los casos especiales en que todos los elementos tengan iguales distri-

buciones, y éstas sencillas; así, cuando se trata del tipo "normal", e^{-x^2}, o del "rectangular", en el que hay constancia entre $-a$ y $+a$. Sin embargo, como yo necesitaba alguna indicación acerca de la manera de variar la probalidad con el aumento de n, he sometido a ensayo empírico la distribución rectangular (números enteros parigualmente distribuídos entre -9 y $+9$): se formaron matrices valiéndose de las tablas de números aleatorios de Fisher y Yates y se comprobó la estabilidad de cada una por la regla de Hurwitz (apartado 20/7). Así, una matriz típica de orden 3×3 era:

$$\begin{bmatrix} -1 & -3 & -8 \\ -5 & 4 & -2 \\ -4 & -4 & -9 \end{bmatrix}$$

(en este caso el segundo determinante es -86, de modo que no es preciso seguir adelante). La comprobación es muy lenta cuando el orden excede de 3×3, pues el tiempo que se invierte aumenta de forma aproximadamente proporcional a n^5. En la tabla 20/10/1 se encuentra un resumen de los resultados.

Orden de la matriz	Número de matrices ensayadas	Número de matrices estables	Tanto por ciento de matrices estables
2×2	320	77	24
3×3	100	12	12
4×4	100	1	1

TABLA 20/10/1.

El rasgo principal consiste en la rapidez con la que probabilidad tiende a cero. Las cifras dadas son compatibles (para $\chi^2 = 4{,}53$ y $P = 0{,}10$) con la hipótesis de que la probabilidad de una matriz de orden $n \times n$ es $1/2^n$: lo que hace pensar que tal es la la expresión correcta para este caso particular es, en parte, el hecho de que pueda demostrarse que lo es cuando $n = 1$ y cuando $n = 2$, y, en parte, el hecho de que para mostrar que es estable, la matriz tinene que pasar satisfactoriamente las n comprobaciones, en cada una de las cuales encontramos, en la realidad, que aproximadamente la mitad falla — si los signos de los determinantes de Hurwitz son estadísticamente independientes, la probabilidad buscada tiene que ser $1/2^n$.

En estas comprobaciones la probabilidad de que las estabilidades intrínsecas de las variables (juzgadas por los signos de los términos de la diagonal principal) fuesen estables o inestables era la misma; por consiguiente, se tiene una variante de interés cuando se considera el caso en que todas las variables sean intrínsecamente estables (cuando todos los términos de dicha diagonal principal estén distribuídos uniformemente entre 0 y —9).

El efecto que se produce es el de aumentar la probabilidad de la estabilidad de las matrices; así, cuando n vale 1, la probabilidad es 1 (en lugar de 1/2), y cuando vale 2 es 3/4 (en lugar de 1/4). En unos ensayos empíricos se encontraron los resultados de la tabla 20/10/2.

Orden de la matriz	Número de matrices ensayadas	Número de matrices estables	Tanto por ciento de matrices estables
2×2	120	87	72
3×3	100	55	55

TABLA 20/10/2.

La probabilidad es más elevada, pero sigue decreciendo al aumentar n.

Hemos llevado a cabo una serie análoga de ensayos con el homeóstato, en los que se permitía que entrasen en interacción las unidades estando cada una de ellas determinada, en sus características, por los uniselectores correspondientes (que permanecían en una posición fija a lo largo de cada ensayo), pues se había cortado la realimentación ultraestable normal. Primeramente, encontrábamos el tanto por 100 de combinaciones estables cuando el número de unidades era igual a dos; luego, en las mismas condiciones generales, pasábamos a tres unidades, y, por fin, a cuatro; después se alteraban tales condiciones y se hallaba una nueva terna de tantos por 100; y todo este proceso se reiteró hasta llegar a un total de seis grupos de comprobaciones. La variación de las condiciones generales unas veces favorecía y otras perjudicaba la estabilidad, de modo que algunas de las ternas eran altas y otras bajas; pero en todos los casos la proporción de las estables descendía al aumentar el número de unidades en interacción. Pueden verse los re-

sultados en la figura 20/10/1, en la que cada terna se encuentra situada sobre una línea.

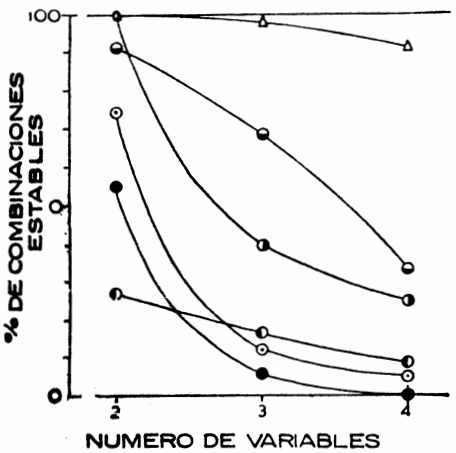


FIGURA 20/10/1

Estos resultados demuestran poco, pero sí sugieren que, en sistemas muy grandes montados al azar, la probabilidad de que haya estabilidad es pequeña. Por tanto, parece que conviene suponer inestables los sistemas lineales grandes, a menos que se encuentren pruebas en contrario.

Parámetros

21/1. En los dos capítulos anteriores hemos estudiado el sistema determinado por estados cuando se encontraba aislado, rodeado de condiciones constantes o sin experimentar modificaciones en su entrada. Vamos a volvernos ahora hacia este sistema cuando *sí* lo afectan los cambios de las condiciones en torno suyo, cuando ya no está aislado o cuando su entrada sufre variaciones. Dicho de otro modo, pasamos a considerar la "máquina con entrada" de *I. to C.*, capítulo IV.

La experiencia ha hecho ver que este paso corresponde a la introducción de parámetros en las representaciones canónicas, de modo que éstas adoptan ahora la forma:

$$dx_i/dt = f_i\,(x_1,\ \ldots,\ x_n;\ a_1,\ a_2,\ \ldots) \qquad (i = 1,\ \ldots,\ n).$$

21/2. Si las *a* permanecen fijas en unos valores *concretos,* el resultado que se obtiene es el de convertir las *f* en un conjunto concreto de funciones de la *x* y, por tanto, el de especificar así un sistema determinado por estados concreto. De ello se sigue que *cada conjunto particular de valores de las* a, *especifica un campo particular;* es decir, que *pueden hacerse corresponder* los dos conjuntos siguientes: 1) los valores de las *a,* y 2) los campos que el sistema puede ostenta — lo cual constituye, acaso, el hecho más fundamental de todo este libro (y que podrá verse gráficamente en la figura 21/8/1).

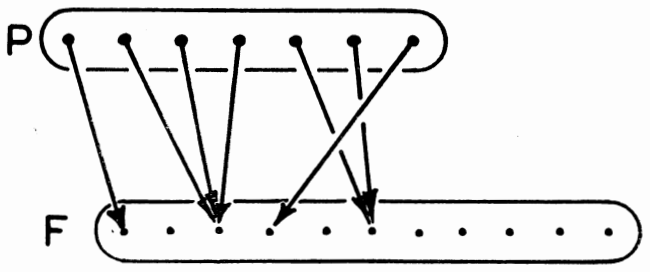


FIGURA 21/2/1.

Es preciso percatarse de que esta correspondencia no es biunívoca, sino sólo unívoca (puede ser de muchos a uno), ya que si bien un valor del vector (a_1, a_2, ...) señalará un campo y uno solo, puede haber varios de estos vectores que señalen el mismo campo: así pues, esta relación es una aplicación de tipo bourbakiano. En la figura 21/2/1 se indican suficientemente las posibilidades a este respecto: en la línea superior, *P*, cada punto representa un valor del vector de los valores de los parámetros (a_1, a_2, ...), y en la inferior, *F*, cada punto representa un campo. Obsérvese que: 1) cada valor del vector dicho señala un campo, 2) ningún valor de aquél señala más de un campo, 3) un campo puede estar señalado por más de un valor de tal vector y 4) puede haber algunos campos no señalados.

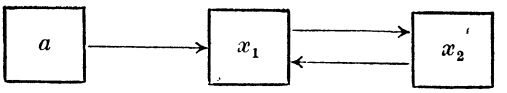
21/3. Si las *a* pueden formar *m* combinaciones de valores, se pueden tener *m* campos; con frecuencia éstos serán distintos, pero no está excluída la posibilidad de que en ellos se encuentren repeticiones y de que, por tanto, no todos los *m* sean diferentes.

21/4. Si un parámetro varía de modo continuo (esto es, por escalones que podamos hacer tan pequeños como queramos), es frecuente que las variaciones correspondientes del campo sean pequeñas, pero no hay nada que elimine la posibilidad de que un cambio arbitrariamente pequeño de un perámetro dé lugar a uno arbitrariamente *grande* del campo; así pues, los campos son frecuentemente, pero no de modo necesario, función continua de los parámetros.

21/5. Si un parámetro sólo afecta inmediatamente a ciertas variables, únicamente aparecerá en las *f* correspondientes. Por tanto, la representación canónica (de una máquina con la entrada *a*)

$$\left.\begin{aligned} dx_1/dt &= f_1(x_1, x_2;\ a) \\ dx_2/dt &= f_2(x_1,\ x_2) \end{aligned}\right\}$$

corresponde al diagrama de efectos inmediatos:



21/6. Mediante un cambio efectuado en los parámetros, es posible representar *cualquier* alteración que pueda efectuarse en un sistema determinado por estados, y, por consiguiente, en cualquier "máquina" física o biológica: incluye, pues, todas las posibilidades de interferencia experimental. Así, si las relaciones de un conjunto de variables que

estuvieran enlazadas formando el sistema $\dot{x} = f(x)$, se modifican de suerte que lleguen a formar el sistema $\dot{x} = \phi(x)$, esta modificación puede representarse lo mismo por un cambio efectuado en un solo sistema, el $\dot{x} = \psi(x; \alpha)$: pues si α puede tomar dos valores (el valor 1 y el 2, digamos) y si

$$f(x) \equiv \psi(x;\ 1)$$
$$\phi(x) \equiv \psi(x;\ 2)$$

las dos representaciones son idénticas.

Como ejemplo de este método, haremos ver que el efecto descrito en el apartado 8/11, en donde indicábamos que se enlazaron los dos imanes delanteros del homeóstato por una fibra de vidrio (con lo que se los obligaba a moverse lateralmente unidos), puede representarse en las ecuaciones canónicas de forma que el estar unidos y el estar separadas equivalgan, respectivamente, a que un parámetro único tome uno u otro de sus dos valores posibles.

Supóngase que se emplean las unidades x_1, x_2 y x_3, y que se enlazan los imanes de 1 y de 2; antes de llevar a cabo esta operación, las ecuaciones eran (cf. 19/11):

$$\left.\begin{aligned} dx_1/dt &= a_{11}\,x_1 + a_{12}\,x_2 + a_{13}\,x_3 \\ dx_2/dt &= a_{21}\,x_1 + a_{22}\,x_2 + a_{23}\,x_3 \\ dx_3/dt &= a_{31}\,x_1 + a_{32}\,x_2 + a_{33}\,x_3 \end{aligned}\right\}$$

Después de hacerlo, podemos pasar por alto x_2 como variable, ya que x_1 y x_2 constituyen, en realidad, una variable única; mas, pese a ello, la salida de x_2 sigue afectando a las demás, y su fuerza continúa actuando sobre la fibra; por consiguiente, aquellas ecuaciones se convierten en:

$$\left.\begin{aligned} dx_1/dt &= (a_{11} + a_{12} + a_{21} + a_{22})\,x_1 + (a_{13} + a_{23})\,x_3 \\ dx_3/dt &= (a_{31} + a_{32})\,x_1 + a_{33}\,x_3 \end{aligned}\right\}$$

Es fácil comprobar que si las ecuaciones completas fuesen, con inclusión del parámetro b, las siguientes:

$$\left.\begin{aligned} dx_1/dt &= \{a_{11} + b\,(a_{12} + a_{21} + a_{22}\ \{x_1 + (1-b)\,a_{12}\,x_2 + (a_{13} + ba_{23})\,x_3 \\ dx_2/dt &= a_{21}\,x_1 + a_{22}\,x_2 + a_{23}\,x_3 \\ dx_3/dt &= (a_{31} + ba_{32})\,x_1 + (1-b)\,a_{32}\,x_2 + a_{33}\,x_3 \end{aligned}\right\}$$

los efectos de unir y de soltar los imanes serían idénticos, respectiva-

mente, a los de dar a b los valores 1 y 0. (Estas ecuaciones son suficientes, pero, naturalmente, no son necesarias.)

21/7. Una variable x_k se comporta como **función nula** si posee las siguientes propiedades (que, como puede demostrarse sin dificultad, son mutuamente necesarias y suficientes):

1) en cuanto función del tiempo, permanece con su valor inicial, x_k^0 ;

2) en las ecuaciones canónicas, $f_k\ (x_1, \ldots, x_n)$ es idénticamente nula, y

3) en las ecuaciones del apartado 19/7, $F_k(x_1^0, \ldots, x_n^0; t) \equiv x_k^0$.

(Se supone que está dada cierta región del espacio de fases.)

En un sistema determinado por estados, llamaremos variables **principales** a las que no sean ni escalonadas ni nulas.

Teorema. — *En un sistema determinado por estados, el subsistema de las variables principales forma un sistema determinado por estados, con tal de que ninguna función escalonada modifique el valor que tuviera inicialmente.*

Supongamos que $x_1, \ldots, x_k$ sean funciones nulas o escalonadas, y que las variables principales sean $x_{k+1}, \ldots, x_n$. Las ecuaciones canónicas del sistema serán:

$$\left.\begin{array}{l} dx_1/dt = 0 \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ dx_k/dt = 0 \\ dx_{k+1}/dt = f_{k+1}(x_1, \ldots, x_k, x_{k+1}, \ldots, x_n) \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ dx_n/dt = f_n(x_1, \ldots, x_k, x_{k+1}, \ldots, x_n). \end{array}\right\}$$

Las k primeras ecuaciones pueden integrarse inmediatamente, y dan $x_1 = x_1^0, \ldots, x_k = x_k^0$; sustituyendo estas igualdades en las restantes ecuaciones, obtenemos:

$$\left.\begin{array}{c} dx_{k+1}/dt = f_{k+1}(x_1^0, \ldots, x_k^0, x_{k+1}, \ldots x_n) \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ dx_n/dt = f_n(x_1^0, \ldots, x_k^0, x_{k+1}, \ldots x_n) \end{array}\right\}$$

Los términos $x_1^0, \ldots, x_k^0$ son ahora constantes, y no son de modo efectivo, en absoluto, funciones de t; por consiguiente, estas ecuaciones se encuentran en forma canónica; luego el sistema está determinado por estados en cualquier intervalo en que no se produzca ningún cambio en las $x_1^0, \ldots, x_k^0$.

Ordinariamente, la elección de las variables que formen un sistema determinado por estados se encuentra fijado por las relaciones reales, naturales, existentes en la "máquina" real, y el observador no puede alterarlas sin alterar a la vez esta misma. No obstante lo cual, este teorema hace ver que el observador puede incluir en el sistema funciones nulas o eliminarlas de él, a su arbitrio, sin afectar su carácter de determinado por estados.

De ello se sigue también que afirmaciones tales como "el parámetro a se mantiene constantemente igual a a^0" y "se define de nuevo el sistema de forma que incluya el parámetro a, que, como función nula, permanece con su valor inicial, a^0", son meramente dos modos distintos de enunciar los mismos hechos.

21/8. El que el campo cambie al producirse un cambio en un parámetro implica que las estabilidades de las líneas de comportamiento pueden cambiar. Por ejemplo, consideremos el sistema:

$$dx_1/dt = -x_1 + ax_2, \qquad dx_2/dt = x_1 - x_2 + 1.$$

Cuando a vale, respectivamente, 0, 1 y 2, el sistema tiene los tres campos que pueden verse en la figura 21/8/1.

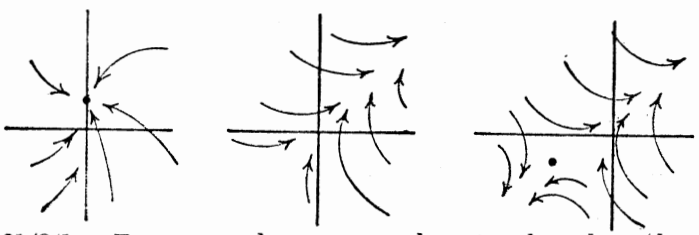


FIGURA 21/8/1. — Tres campos de x_1 y x_2 cuando a tiene los valores (de izquierda a derecha) 0,1 y 2.

Cuando $a = 0$, existe un estado de equilibrio estable en $x_1 = 0$, $x_2 = 1$; cuando $a = 1$ no hay estado de equilibrio, y cuando $a = 2$ se tiene un estado de equilibrio inestable en $x_1 = -2$, $x_2 = -1$. Este sistema tiene tantos campos cuantos sean los valores de a.

Enlace de sistemas

21/9. (Una vez más, hemos expuesto los conceptos básicos en *I. to C.*, en el apartado 4/7; aquí vamos a presentar la teoría correspondiente a los sistemas continuos.)

El simple acto físico de enlazar dos máquinas tiene, desde luego, su contrapartida en las ecuaciones (que se advierte con mayor sencillez en las canónicas que en las del apartado 19/7).

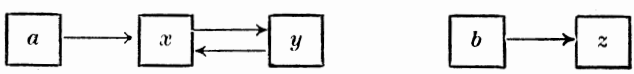
Naturalmente, lo que podría hacerse es simplemente escribir unas ecuaciones en todas las variables y hacer luego que un parámetro, a, tomase un valor cuando las partes estén unidas y otro cuando estén separadas. Este método, sin embargo, no permite penetrar en los acontecimientos reales que ocurran al "enlazar" dos sistemas; hay otro mejor, que consiste en hacer que los parámetros de un sistema se conviertan en funciones definidas de las variables del otro: cuando ello sucede, el segundo domina al primero; si en cada uno de ellos ciertos parámetros se transforman en funciones de las variables del otro, se produce una interacción en ambas direcciones. Por ejemplo, supongamos que partimos del sistema de 2 variables

$$\left.\begin{aligned} dx/dt &= f_1(x,\ y;\ a) \\ dy/dt &= f_2(x,\ y) \end{aligned}\right\}$$

y del sistema de 1 variable:

$$dz/dt = \phi(z;\ b);$$

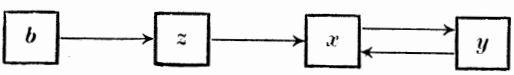
entonces, el diagrama de efectos inmediatos es:



Si hacemos que a sea una función de z, por ejemplo (en beneficio de la sencillez) $a = z$, el nuevo sistema tendrá por ecuaciones:

$$\begin{aligned} dx/dt &= f_1(x,\ y;\ z) \\ dy/dt &= f_2(x,\ y) \\ dz/dt &= \phi(z;\ b) \end{aligned}$$

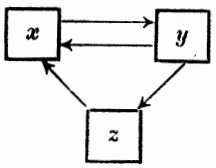
y el diagrama de efectos inmediatos se convierte en:



Si efectuamos otro enlace haciendo $b = y$, las ecuaciones pasan a ser:

$$\begin{aligned} dx/dt &= f_1(x,\ y;\ z) \\ dy/dt &= f_2(x,\ y) \\ dz/dt &= \phi(z;\ y) \end{aligned}$$

y el diagrama es ahora:



En este método, cada vínculo se apropia de un parámetro, lo cual es razonable, pues éste podría haberse empleado por el experimentador para intervenir a su arbitrio; de modo que así se trueca, simplemente, el experimentador por otro sistema.

Al llegar a cabo enlaces por este procedimiento, no se hace violencia a las actividades internas de cada sistema, que continúan lo mismo que antes, salvo en cuanto que resulten modificadas por los efectos procedentes de las variables que antes eran parámetros.

21/10. Teorema. *El conjunto total formado por enlace de diversas partes tiene mayor abundancia de modos de comportarse que el que se obtiene dejando tales partes aisladas.*

(La argumentación es muy sencilla y clara si suponemos que cada parte tenga un número finito de estados posibles, y si el número de estados de la entrada es también finito. El caso de la infinidad, que constituye el límite del de la finitud, se encuentra en las mismas condiciones que éste, pero su estudio necesitaría una técnica especial.)

Supongamos que el sistema conste de p partes, cada una de ellas capaz de encontrarse en s estados, y que tanto p como s sean finitos; entonces, el número de estados posibles del conjunto de todas, ya estén enlazadas o no, será s^p (para simpificar, hagamos $s^p = k$).

Si el todo posee gran riqueza de enlaces, cada uno de estos k estados podrá pasar, en una transición, a uno cualquiera de los mismos, pues no se imponen restricciones sobre las transiciones de las partes (dado que cada una de ellas puede estar condicionada por los estados de las demás partes y variar con ellos). Luego el número de transformaciones posibles es k^k.

Pero si las partes no están enlazadas, las transformaciones que experimente cada una de ellas no pueden variar de acuerdo con los estados de las otras, con lo que la transformación del todo ha de formarse tomando para cada parte una sola transformación: cada parte, que tie-

ne s estados posibles, puede sufrir s^s transformaciones, y el todo podrá experimentar, a su vez $(s^s)^p$, o sea, k^s transformaciones posibles.

Como s es menor que k, k^s es menor que k^k; y de aquí el teorema.

21/11. Si $X_1, \ldots, X_n$ es un estado de equilibrio del sistema

$$dx_i/dt = f_i\,(x_1, \ldots, x_n;\ a_1, \ldots) \qquad (i = 1, \ldots, n)$$

para ciertos valores de las a, y se lo enlaza luego a ciertas y haciendo que las a sean funciones de las y, $X_1, \ldots, X_n$ seguirán constituyendo un estado de equilibrio (del sistema de las x) cuando las y hagan tomar a las a sus valores originales; así pues, *ni* los ceros de las f *ni* los estados de equilibrio del sistema quedan alterados cuando se ejecuta la operación de enlace.

21/12. Por otra parte, las estabilidades pueden alterarse fuertemente.

En el caso general, esto es, cuando las f no están sujetas a ninguna restricción, no es fácil dar un significado a esta proposición; pero en el caso lineal (al que se aproximan todos los sistemas continuos, según el apartado 20/5), es claro lo que quiere decir. Vamos a presentar tres ejemplos.

Ejemplo 1. Dos sistemas pueden dar lugar a un todo estable cuando se los enlace de un modo y a uno inestable cuando se haga de otro. Consideremos los sistemas de una variable $dx/dt = x + 2p_1 + p_2$ y $dy/dt = -2r - 3y$. Si se los enlaza haciendo $r = x$, $p_1 = y$, el sistema será:

$$\left.\begin{aligned} dx/dt &= x + 2y + p_2 \\ dy/dt &= -2x - 3y \end{aligned}\right\}$$

y las raíces latentes de su matriz son -1, -1; de modo que es estable. Pero si se los enlaza por medio de $r = x$, $p_2 = y$, las raíces se convierten en $+0{,}414$ y $-2{,}414$, luego entonces es inestable.

Ejemplo 2. Con sistemas estables puede formarse, al enlazarlos, un todo inestable. Unamos los tres sistemas

$$\begin{aligned} dx/dt &= -x - 2q - 2r \\ dy/dt &= -2p - y + r \\ dz/dt &= p + q - z \end{aligned}$$

que son estables individualmente, haciendo $p = x$, $q = y$, $r = z$; el sistema resultante tiene por raíces latentes $+1$, -2 y -2.

Ejemplo 3. Con sistemas inestables puede formarse, al enlazarlos, un todo estable. Enlácese el sistema de dos variables:

$$\left.\begin{aligned} dx/dt &= 3x - 3y - 3p \\ dy/dt &= 3x - 9y - 8p \end{aligned}\right\}$$

que es inestable, a este otro, $dz/dt = 21q + 3r + 3z$ (que también es inestable), por medio de $q = x$, $r = y$, $p = z$: el todo resultante es estable.

El sistema determinado por estados

21/13. Está claro, pues, que, en general, hay dos maneras de llegar a conocer un sistema dinámico complejo (es decir, formado por muchas partes).

Una es la de conocer las partes — en último término, las variables individuales — aisladas y el modo en que se encuentren enlazadas: "conocer" cada parte, o cada variable, quiere decir ser capaz de escribir las líneas correspondientes de la representación canónica (si no en un simbolismo matemático, al menos de cualquier otro modo que nos proporcione una formulación inequívoca de estos mismos hechos); y conocer el modo en que se hallen enlazadas significa que [se sepa cómo] se pueden eliminar de tales partes ciertos parámetros (por ser funciones de las variables); de esta forma se llega a la representación canónica del todo, cuyas líneas de comportamiento se obtendrán por integración. Así pues, podemos pasar de un conocimiento empírico de las partes y de su forma de estar enlazadas a un conocimiento *deductivo* del todo.

La otra manera consiste en observar el conjunto total y sus líneas de comportamiento; así se llega a las funciones del apartado 19/7, cuya diferenciación (como en el corolario de 19/9) nos proporciona la representación canónica, y, con ésta, la de las partes — para cada una de las cuales sirven ahora de parámetros las demás variables —. De modo que podemos pasar de un conocimiento empírico del todo a uno *deductivo* de las partes y de cómo se encuentren enlazadas.

21/14. Así se va aclarando por qué son tan centrales para la teoría de mecanismos el sistema determinado por estados y la representación canónica vinculada a él: si un conjunto de variables está determinado por estados y elicitamos su representación canónica por medio de operaciones primarias, llegamos a un conocimiento *completo* de tal sistema. Sin duda alguna, no es un conocimiento completo de la "máquina" real de donde se haya extraído, que es, probablemente, inagotable, pero lo *es* del sistema abstracto: completo en el sentido de que las predicciones que podemos hacer ahora son unívocas y están verificadas, es decir, han alcanzado su fin (local). Si una persona que se dedique a hacer pronósticos hípicos indica para cada carrera un solo caballo, y

si siempre resultan vencedores los que pronostique, por muy ignorante que sea en otros respectos hemos de reconocer que sus conocimientos en esta esfera son completos.

Por consiguiente, el sistema determinado por estados tiene que gozar de un puesto clave en la teoría de mecanismos, en virtud de la estrategia del apartado 2/17. Pues, dado que el conocimiento de esta forma es completo y máximo, todas las demás ramas de la teoría, que se ocupan de lo que suceda en otros casos, tienen que poderse extraer de este caso central como variaciones de la pregunta: ¿qué ocurrirá si mis conocimientos son incompletos en el sentido de que...?

Así pues, llegamos a esos sistemas que realmente aparecen con enorme frecuencia en el mundo biológico: aquéllos cuyas variables son sólo parcialmente accesible a la observación directa, los que es necesario observar de cierto modo que no permite distinguir todos los estados, los que únicamente podemos someter a observación durante ciertos intervalos, etc.

21/15. El "transductor sin ruido", definido por Shannon, es idéntico al sistema determinado por estados. Este autor los define como aquel transductor que, teniendo los estados α y la entrada x, pasará, si se encueentra en el estado α_n y se lo somete a la entrada x_n, a un nuevo estado, α_{n+1}, que sea solamente función de x_n y de α_n:

$$\alpha_{n+1} = g(x_n, \alpha_n).$$

Aun cuando expresada de una forma que, en lo superficial, difiere de la de la representación canónica, esta ecuación es idéntica a ella: pues dice simplemente que si se dan los parámetros x y el estado del sistema, el siguiente estado de éste se encuentra determinado. Así pues, si el ingeniero de comunicación observase por primera vez lo que hacen el biólogo y el psicólogo, diría que, al parecer, prefieren trabajar con sistemas sin "ruido"; y este comentario no sería tan trivial como puede creerse, pues de lo que señala se sigue la posibilidad de efectuar deducciones rigurosas.

Los efectos de la constancia

22/1. Una variable se comporta como **función escalonada** a lo largo de un período de observación dado si varía sólo en número finito de instantes discretos, en los que cambie de valor instantáneamente y mediante un salto finito.

22/2. Vamos a presentar un ejemplo de una función escalonada en un sistema, con objeto de asentar sus propiedades principales.

Supongamos que una masa, m, cuelga de un filamento elástico sin masa (que llegaría a romperse si se lo estirase excesivamente). Admitamos que el filamento tire con una fuerza de k dinas por cada centímetro de aumento de longitud (con respecto a la que tenga cuando no se lo estire) y, para simplificar, que ejerza una fuerza en sentido contrario cuando se lo someta a compresión; admitamos también que x, la posición de la masa, se mida verticalmente hacia abajo, y que se tome como cero la posición del filamento elástico cuando no haya masa suspendida.

Si ésta parte de una posición situada en la vertical del punto de reposo, pero por encima o por debajo de él, el movimiento estará dado por la ecuación:

$$\frac{d}{dt}\left(m\frac{dx}{dt}\right) = gm - kx \tag{1}$$

siendo g la aceleración de la gravedad. Esta ecuación no se encuentra en la forma canónica, pero se la puede llevar a ella escribiendo $x = x_1$, $dx/dt = x_2$, con lo que se transforma en:

$$\left.\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= x_2 \\ \frac{dx_2}{dt} &= g - \frac{k}{m}x_1 \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

Si el elástico se rompe, k se hace 0 y las ecuaciones pasan a ser:

$$\left.\begin{aligned}\frac{dx_1}{dt} &= x_2\\ \frac{dx_2}{dt} &= g\end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

Supongamos que la rotura tiene lugar si se estira el filamento una longitud superior a X. Podemos mirar los acontecimientos que se producirán entonces de dos maneras equivalentes entre sí.

Es posible considerar el cambio que experimenta k como uno sufrido po r un parámetro del sistema de dos variables x_1, x_2, que da lugar a que sus ecuaciones dejen de ser las de (2) y se conviertan en las de (3) (cf. 21/1). El campo de este sistema pasará del A al B de la figura 22/2/1, en la que la línea de puntos señalada con X indica que

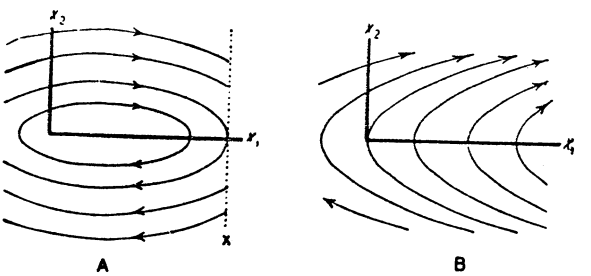


FIGURA 22/2/1 — Dos campos del sistema (x_1, x_2) del apartado 22/2. Cuando el filamento elástico está entero se comporta como se muestra en A, y cuando está roto, como en B. Al estirar el filamento hasta la posición X se rompe.

no se debe utilizar el campo situado a su derecha (pues al llegar a X el elástico se rompería).

La perspectiva que se ocupa de ello como de un sistema de tres variables (x_1, x_2, k) es equivalente a la anterior; ahora el sistema está determinado por estados, y posee un solo campo, que puede verse en la figura 22/2/2.

En esta forma es preciso introducir la función escalonada en las ecuaciones canónicas; uno de los modos posibles de hacerlo es la adoptando:

$$\frac{dk}{dt} = q\left(\frac{K}{2} + \frac{K}{2}\ \text{th}\ \{q\,(X - x_1)\} - k\right) \qquad (4)$$

en donde K sea el valor inicial de la variable k y q sea una cantidad positiva y muy grande (al hacer que $q \to \infty$, el comportamiento de k tenderá hacia la forma de una función escalonada).

Otro método consiste en utilizar la función δ de Dirac, que se define por $\delta(u) = 0$ si $u \neq 0$, en tanto que si $u = 0$, $\delta(u)$ tiende a infinito de modo que se cumpla:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(u)\, du = 1.$$

Por tanto, si $du/dt = \delta\{\phi(u, v, \ldots)\}$, normalmente du/dt será cero; pero si las variaciones que experimenten u, v, ... hacen pasar por cero

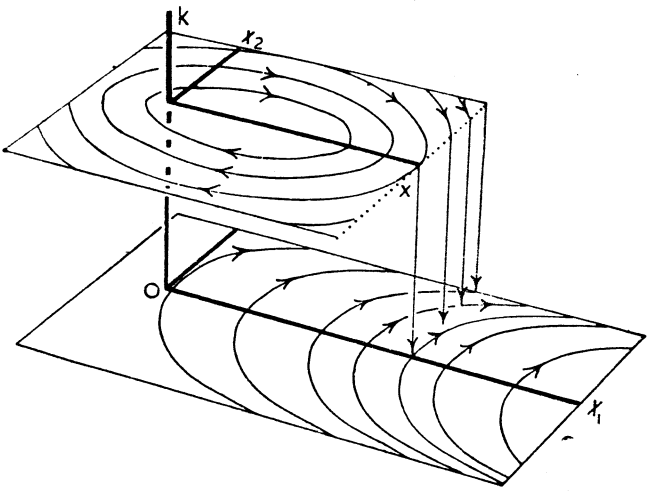


FIGURA 22/2/2 — Campo del sistema de tres variables.

a ϕ, $\delta(u)$ se hace momentáneamente infinita y u cambiará dando un salto finito. Estas representaciones tienen escasa utilidad práctica, pero son muy importantes teoréticamente, ya que hacen ver que una función escalonada *puede* aparecer en la representación canónica de un sistema.

22/3. En un sistema determinado por estados, se producirá un cambio en una función escalonada si y sólo si aquél llega a ciertos estados: los **críticos.** En la figura 22/2/2, por ejemplo, todos los puntos del plano $k = K$ (el plano superior) situados a la derecha de la línea $x = X$ son críticos para la función escalonada k cuando ésta posee un valor inicial, K.

Como es natural, los estados críticos pueden estar distribuídos arbitrariamente; sin embargo, es más frecuente la distribución continua; y en este caso, existirá una **superficie crítica**:

$$\phi(k, x_1, \ldots, x_n) = 0$$

que, dada k, divida los estados críticos de los no críticos. En la figura 22/2/2, por ejemplo, esta superficie corta al plano $k = K$ en la línea $x = X$ (pero no tiene intersección con el plano $k = 0$, pues en este sistema no hay estado alguno cuya aparición hiciese que k dejara de valer 0).

Ordinariamente, ϕ es función de sólo unas pocas variables del sistema; así, el que un relevador de telegrafía se abra o se cierre depende únicamente de dos variables: la corriente que circule por la bobina y el que se encuentre abierto o cerrado.

En el homeóstato aparecen tales relevadores y estados críticos. Cuando se hallan en funcionamiento dos, tres o cuatro unidades, las superficies críticas forman (en primera aproximación) en el espacio de fases, respectivamente, un cuadrado, un cubo o un octoedro tetradimensional de aristas iguales [*tesseract*], centrados alrededor del origen de aquél, y los estados críticos ocupan el espacio situado en el exterior de tal superficie. Como siempre existe cierta holgura en los relés, las superficies críticas de apertura y las de cierre no son idénticas entre sí.

Sistemas con campos múltiples

22/4. Si en el ejemplo anterior alguien rompiese ocasionalmente el filamento elástico y lo sustituyese por otro algunas veces, todo ello sin saberlo nosotros, y si sometiéramos a ensayo el comportamiento de tal sistema, x_1, x_2, durante un tiempo bastante largo, que incluyese muchas acciones de este tipo, observaríamos que frecuentemente estaba determinado por estados con un campo semejante al *A* de la figura 22/2/1, que otras muchas veces lo estaba asimismo, pero con un campo del tipo del *B* de la misma figura, y que de cuando en cuando pasaba súbitamente de una forma a la otra.

Podríamos decir sin ambigüedad que semejante sistema tenía dos campos. Y, análogamente, en caso de que unos parámetros capaces de adoptar r combinaciones de valores estuviesen sometidos a modificaciones ocasionales procedentes de otro sistema no observado, podríamos encontrar que aquel primer sistema tenía r campos.

22/5. Es posible emplear este mismo razonamiento, hasta cierto punto, en dirección inversa, ya que se puede utilizar a la inversa, si bien con cierta cautela, la correspondencia expuesta en 21/2; pues aunque el número de campos no prescribe el de valores de los parámetros, sí fija con precisión su número *mínimo* (así, los campos que varíen como

la primera línea de letras del apartado 9/13, exigen un mínimo de 4 valores de los parámetros, mientras que los que lo hagan como la segunda, necesitan un mínimo de 15).

Si el observador encuentra un solo campo en forma persistente, el número mínimo de parámetros es, desde luego, uno; en caso de que pase bruscamente a ser distinto y de que este nuevo campo persista luego, puede deducir que el valor de los parámetros *tiene* que haber cambiado (pues ningún valor único podría haber dado lugar a dos campos) y que el número mínimo de valores correspondiente al nuevo período de persistencia es, de nuevo, uno. Por tanto, puede deducir legítimamente que la variedad *mínima* que cabe atribuir a los valores de los parámetros es, medida en la escala del apartado 7/13, la de la función escalonada; la función nula es insuficiente, y la parcial constituye un exceso innecesario (cf. los apartados 9/10-13).

El sistema ultraestable

22/6. La definición y descripción del apartado 7/26 han asentado ya las propiedades del sistema ultraestable; pero el formularlas de nuevo, esta vez en forma matemática, presenta la ventaja de hacer menos probable que se produzca una mala inteligencia, así como la de proporcionarnos una base para estudios cuantitativos.

Si un sistema es ultraestable, está compuesto por las variables principales x_i y las funciones escalonadas a_i en forma tal que el todo se haye determinado por estados:

$$dx_i/dt = f_i\,(x;\ a) \qquad (i = 1,\ \ldots,\ n)$$
$$da_i/dt = g_i\,(x;\ a) \qquad (i = 1,\ 2,\ \ldots).$$

(Es preciso dar a las funciones g_i una forma análoga a las de 22/2.) El sistema empieza teniendo el punto representativo en la superficie crítica, $\phi\,(x) = 0$, y este contacto hace que cambien de valor las funciones escalonadas; los nuevos valores de a_i a que se llegue han de ser muestras aleatorias extraídas de cierta distribución que supondremos dada.

Así, en el homeóstato, las ecuaciones de las variables principales son (cf. 19/11):

$$dx_i/dt = a_{i1}\,x_1 + a_{i2}\,x_2 + a_{i3}\,x_3 + a_{i4}\ \ x_4 \qquad (i = 1, 2, 3, 4).$$

Aquí las a son funciones escalonadas, procedentes de una distribución de forma "rectangular" que se extiende parigualmente entre -1 y $+1$,

y su superficie crítica se encuentra especificada aproximadamente por $|x| \pm \frac{\pi}{4} = 0$ (el valor que tome cada función individual, a_{jk}, depende solamente de que x cruce o no tal superficie).

Como las a cambian de modo discontinuo, no es posible — que yo sepa — efectuar una integración analítica de las ecuaciones integrales; pero éstas, la descripción y el trazado de las conexiones del uniselector (las muestras aleatorias) definen de modo unívoco el comportamiento de las x y de las a, de forma que puede calcularse el comportamiento con el grado de aproximación que se quiera valiéndose de métodos numéricos.

22/7. ¿Cuántos ensayos serán necesarios, por término medio, para llegar a un campo terminal? Si un sistema ultraestable tiene una probabilidad p de que un nuevo campo de las variables principales sea estable, y si las probabilidades de los distintos campos son independientes, el número de campos que aparezca (incluyendo el terminal) será, por término medio, $1/p$.

En efecto. De los campos que pueda encontrar primero, serán terminales la proporción p, y no lo serán la q $(= 1 - p)$; al pasar a un segundo campo, habrá que considerar la proporción p (de estos últimos) como terminales y la q como no terminales, de modo que la segunda vez que se llegue a un campo nuevo la proporción total de los estables será pq, y el número de los aún inestables, q^2; análogamente, la proporción de campos terminales en el u-ésimo ensayo será pq^{u-1}, por lo cual el número medio de ensayos que se hagan será:

$$\frac{p + 2pq + 3pq^2 + \ldots + upq^{u-1} + \ldots}{p + pq + pq^2 + \ldots + pq^{u-1} + \ldots} = \frac{1}{p}.$$

La independencia temporal

22/8. Nos hemos ocupado de la relación existente entre una variable y otra observando el comportamiento del sistema total; pero, ¿qué ocurre con sus efectos mutuos?: es decir, si el valor de una variable cambia, ¿podemos distribuir su causa entre las demás?

En general, no es posible dividir el efecto en partes, y decir que a esta variable se debe esto, y aquélla, esto otro: sólo se puede efectuar semejante división cuando se presentan unas simplificaciones especiales. **En general, la modificación experimentada por una variable es resultado de la actividad del sistema total, y no cabe subdivi-**

dirla cuantitativamente. Así, si $dx/dt = \text{sen } x + xe^y$, y se tienen los valores $x = 1/2$ e $y = 2$, en la próxima 1/100 de la unidad de tiempo x aumentará en 0,042, pero esta cantidad no puede dividirse en dos partes, una debida a x, y otra, a y. Solamente cuando se cuenta con ciertos tipos especiales de sencillez puede representarse razonablemente el efecto total como *suma* de dos, cada uno debido a una de las variables; mas tales tipos, aun cuando no infrecuentes en la física teórica, son raros en los sistemas biológicos.

22/9. Dados un sistema determinado por estados, su campo, una línea de comportamiento de éste y una porción concreta de tal línea, y dado también que x_p sea una función parcial, las siguientes fórmulas y proporciones son equivalentes (en el sentido de que la verdad (o la falsedad) de una cualquiera de ellas implica la verdad (o la falsedad, respectivamente) de todas las demás):

1) x_p es constante (inactiva);
2) $dx_p/dt \equiv 0$;
3) $f_p(\ldots, x_p, \ldots) \equiv 0$,
4) $x_p = x_p^0$ independientemente de t, y
5) $F_p(x^0; t) \equiv x_p^0$, con tal de que los valores de t no correspondan a una parte de la línea exterior a P;

entendiendo siempre que todo ello se refiere sólo a la región P. (Estas equivalencias se siguen fácilmente de las propiedades de las ecuaciones del apartado 19/9 y de sus integrales.)

22/10. Dados un sistema determinado por estados y dos transiciones a partir de dos estados iniciales que difieran solamente en sus valores de x_j^0 (siendo Δx_j^0 su diferencia), la variable x_k es **independiente** de x_j si la transición de aquella variable es idéntica en ambos casos; analíticamente: x_k es independiente de x_j en las condiciones expuestas si:

$$F_k(x_1^0, \ldots, x_j^0, \ldots; dt) = F_k(x_1^0, \ldots, x_j^0 + \Delta x_j^0, \ldots; dt). \qquad (1)$$

Dicho de otro modo, x_k es independiente de x_j si el comportamiento de la primera es invariante cuando el estado inicial experimenta el cambio Δx_j^0 ("cambio" que es preciso no confundir con el que simbolizamos con dt.

Esta estrecha definición proporciona una base para desarrollos pos-

teriores. En las aplicaciones prácticas, la identidad (1) puede cumplirse para todos los valores de Δx_j^0 (acaso dentro de un ámbito finito), y posiblemente también para todos los estados iniciales de x_k (tal vez, asimismo, dentro de cierto ámbito finito); en semejantes casos, el criterio de independencia de x_k respecto de x_j consiste en que se cumpla:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} F_k (x^0; t) \equiv 0.$$

(Es necesario que esté especificado, ya sea explícitamente o por implicación, el ámbito en que se cumpla la relación o ecuación.)

Los diagramas de efectos

22/11. El diagrama de efectos inmediatos y la representación canónica guardan entre sí una relación muy sencilla. Partamos del punto de vista pragmático y empírico del apartado 2/7, y supongamos que el observador llegue a sus conocimientos básicos acerca del sistema ejecutando operaciones primarias; éstas le proporcionarán las funciones F_i del apartado 19/7 y, asimismo (en virtud de 4/12), el diagrama de efectos inmediatos; ahora bien, la comprobación de si hay que dibujar o no una flecha de x_j a x_k es esencialmente la misma que la comprobación (efectuada algebraicamente) para ver si x_j^0 aparece efectivamente en F_k, y los resultados de ambas tienen que estar de acuerdo; mas (por el corolario de 19/9), el que F_k contenga o no x_j^0 efectivamente a lo largo de un solo paso, dt, tiene que concordar con el que f_k contenga o no a x_j de modo efectivo; por tanto, en el diagrama de efectos *inmediatos* habrá una flecha de x_j a x_k si y sólo si en la representación canónica x_j aparece efectivamente en f_k. (Suponemos que el ámbito de los argumentos de las f está especificado.)

22/12. Puede mostrarse también que el diagrama de efectos *últimos* posee la propiedad de que hay una flecha que va de x_j a x_k si, y sólo si, en las ecuaciones del apartado 19/17, $x^0{}_j$ aparece de modo efectivo en F_k (dentro de un ámbito especificado).

(En la primera edición de esta obra hemos tratado esta cuestión de modo más completo, pero ahora es innecesario repetirlo por extenso.)

22/13. Es digno de advertirse que, dados n puntos arbitrarios, puede dibujarse un diagrama de efectos inmediatos trazando arbitrariamente un número cualquiera de flechas; mas el de efectos últimos no puede dibujarse de tal modo; pues una flecha que vaya de p a q y una de q a r implican una que vaya de p a r. Así pues, mientras que los diagramas de efectos inmediatos no están, en general, sujetos a ninguna restricción, los de efectos últimos tienen que ser transitivos.

22/14. Podemos ocuparnos ahora en forma rigurosa de la tesis del apartado 12/10. Adoptemos como diagrama de efectos inmediatos la figura 12/10/1, y supongamos que el todo esté aislado y determinado por estados (por facilidad de escritura utilizaremos el *sub*índice A para indicar referencia a "cualquier variable del conjunto A", y análogamente con B y C). Entonces, la representación canónica del todo tiene que poseer la forma:

$$\left.\begin{aligned} \dot{x}_A &= f_A(x_A,\ x_B) \\ \dot{x}_B &= f_B(x_A,\ x_B,\ x_C) \\ \dot{x}_C &= f_C(x_C,\ x_C) \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

con la condición de que x_C no se encuentre en f_A, ni x_A en f_C. Podemos demostrar ahora las dos partes del teorema.

1) Supóngase que las B sean funciones nulas (en un ámbito especificado): serán, pues, constantes. Representemos colectivamente sus valores escribiendo β; así, la línea superior de (1) se convierte en

$$\dot{x}_A = f_A(x_A,\ \beta)$$

lo cual hace ver que el sistema formado por las variables x_A está determinado por estados (mientras β se mantenga constante); además, las integrales de estas ecuaciones, es decir, las F_A, no pueden contener $x^0{}_C$, de modo que el sistema A es independiente del C.

Una demostración análoga permitiría ver que C está determinado por estados, y es independiente de A. De modo que un muro de constancias (las funciones nulas de B) entre los sistemas A y C basta para hacer que ambos estén determinados por estados y sean independientes uno de otro.

2) Supóngase que observamos que tanto el sistema A como el C están determinados por estados, y son independientes entre sí. Partiremos de que el todo se encuentre también determinado por estados, y de que sepamos que no hay ninguna conexión inmediata que vaya de

A a *C*, ni a la inversa, pero que *sí* la hay, efectiva, entre *A* y *B* y entre *C* y *B*: ¿qué puede deducirse acerca de las variables de *B*?

La falta de conexiones entre *A* y *C* manifiesta que la representación canónica ha de tener la forma expresada arriba, en las fórmulas (1); pero, en virtud de

$$\dot{x}_A = f_A(x_A, \quad x_B)$$

las variables de *A* sólo pueden formar un sistema determinado por estados si todas las de *B* son constantes (esto es, no son funciones efectivas del tiempo); luego estas últimas variables tienen que ser funciones nulas.

Referencias

ASHBY, W. Ross. Adaptiveness and equilibrium. *Journal of Mental Science,* **86,** 478; 1940.

Idem. The physical origin of adaptation by trial and error. *Journal of general Psychology,* **23,** 13; 1945.

Idem. Effect of controls on stability. *Noture,* **155,** 242; 1945.

Idem. Interrelations between stabilities of parts within a whole dynamic system. *Journal of comparative and physiological Psychology,* **40,** 1; 1947.

Idem. The nervous system as physical machine: with special reference to the origin of adaptive behaviour. *Mind,* **56,** 1; 1947.

Idem. Design for a brain. *Electronic Engineering,* **20,** 379; 1958.

Idem. The stability of a randomly assembled nerve-network. *Electro-encephalography and clinical Neuro-physiology,* **2,** 471; 1950.

Idem. Can a mechanical chess-player cutplay its designer? *British Journal for the Philosophy of Science,* **3,** 44; 1952.

Idem. An introduction to cybernetics. Londres, 2.ª reimp., 1958 [versión castellana: *Introducción a la cibernética,* Buenos Aires, Nueva Visión, 1960].

BOURBAKI, N. *Théorie des ensembles;* fascicule de résultats. Act. Ss. et Ind. n.° 1141; París, 1951.

Idem. Algèbre. Act. Ss. et Ind. n.° 1144.

Idem. Topologie. Act. Sc. et Ind. n.° 1141.

BOYD, D. A., y NIE, L. W. Congenital universal indifference to pain. *Archives of Neurology and Psychiatry,* **61,** 402; 1949.

CANNON, W. B. *The wisdom of the body.* Londres, 1932.

CAREY, E. J., MASSOPUST, L. C., KEIT, W., HAUSHALTER, E., y SCHMITZ, J. Experimental pathologic effects of traumatic shock on motor end plates in skeletal muscle. *Journal of Neuropathology and experimental Neurology,* **4,** 134; 1945.

COWLES, J. T. Food-tokens as incentives for learning by chimpanzees. *Comparative Psychology Monographs,* **14,** No. 71; 1937-8.

DANCOFF, S. M. y QUASTLER, M. Information content and error rate of living things. En *Information theory in biology,* editado por H. Quastler. Urbana, 1953.

GIRDEN, E., y CULLER, E. Conditioned responses in curarised striate muscle in dogs. *Journal of comparative Psychology,* **23,** 261; 1937.

GRANT, W. T. Graphic methods in the neurological examination: wavy tracings to record motor control. *Bulletin of the Los Angeles Neurological Society,* **12,** 104; 1947.

GRINDLEY, G. C. The formation of a simple habit in guinea-pigs. *British Journal of Psychology,* **23,** 127; 1932-3.

HARRISON, R. G. Observations on the living developing nerve fiber. *Proceedings of the Society for experimental Biology and Medicine,* **4,** 140; 1906-7.

HILGARD, E. R., y MARQUIS, D. G. *Conditioning and learnig.* Nueva York, 1940.

HOLMES, S. J. A tentative classification of the forms of animal behavior. *Journal of comparative Psychology,* **2,** 173; 1962.

HUMPHREY, G. *The nature of learning.* Londres, 1933.

HURWITZ, A. Über die Bedingungen, unter welchen eine Gleichung nur Wurzeln mit negativen reelen Teilen besitzt. *Mathematische Annalen,* **46**, 273; 1895.

JENNINGS, H. S. *Behavior of the lower organisms.* Nueva York, 1906.

LASHLEY, K. S. Nervous mechanisms in learning. En *The foundations of experimental psychology,* editado por C. Murchison. Worcestef, 1929.

LEVI, G. Ricerche sperimentali sovra elementi nervosi sviluppati 'in vitro'. *Archiv für experimentelle Zellforschung,* **2**, 245; 1933.

LORENTE DE NÓ, R. Vestibulo-ocular reflex arc. *Archives of Neurology and* Psychiatry, **30**, 245; 1933.

MCDOUGALL, W. *Psychology.* Nueva York, 1912.

MARINA, A. Die Relationen des Palace-encephalons (Edinger) sind nicht fix. *Neurologisches Zentralblatt,* **34**, 338; 1951.

MORGAN, C. LLOYD. *Habit and instinct.* Londres, 1896.

MOWRER, O. H. An experimental analogue of 'regression' with incidental observations on 'reaction-formation'. *Journal of abnormal and social Psychology,* **35**, 56; 1940.

MÜLLER, G. E., y PILZECKER, A. Experimentelle Beiträge zur Lehre vom Dedächtnis. *Zeitschrift für Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane.* Ergäanzungsband No. 1; 1900.

NYQUIST, H. Regeneration theory. *Bell System technical Journal,* **11**, 126; 1932.

PARKER, G. *The evolution of man.* Nueva Haven, 1922.

PAULING, L. En *Cerebral mechanisms in behavior,* editado por Lloyd A. Jeffres. Nueva York, 1951.

PAVLOV, I. P. *Conditioned reflexes.* Oxford, 1927.

RIGUET, J. Sur les rapports entre les concepts de machine de multipole et de structure albébrique. *Comptes rendues de l'Académie des Sciences,* **237**, 425; 1953.

ROBINSON, E. S. Some factors detedmining the degree of retroactive inhibition. *Psychological Monographs,* **28**, No. 128; 1920.

ROSENBLUETH, A.; y WIENER, N., y BIGELOW, J. Behavior, purpose and teleogy. *Philosophy of Science,* **10**, 18; 1943.

SHANNON, C. E., y WEAVER, W. *The mathematical theory of communication.* Urbana, 1949.

SHERRINGTON, C. E. *The integrative action of the nervous system.* Nueva Haven, 1906.

SKAGGS, E. B. Further studies in retroactive inhibition. *Psychological Monographs,* **34**, No. 161; 1925.

SOMMERHOFF, G. *Analytical biology.* Oxford, 1950.

SPEIDEL, C. C. Activities of amoeboid growth cones, sheath cells, and myelin segments as revealed by prolonged observation of individual nerve fibers in frog tadpoles. *American Journal of Anatomy,* **52**, 1; 1933.

Idem. Effects of metrazol on tissues of frog tadpoles with special reference to the injury and recovery of individual nerve fibers. *Proceedings of the American Philosophical Society,* **83**, 349; 1940.

SPERRY, R. W. Effect of crossing nerves to antagonistic limb muscles in the monkey. *Archives of Neurology and Psychiatry,* **58**, 452; 1947.

TEMPLE, G. *General principles of quantum theory.* Londres, 2.ª ed., 1942.

WIENER, N. *Cybernetics.* Nueva York, 1948.

WOLFE, J. B. Effectiveness of token-rewards for chimpanzees. *Comparative Psychology Monographs,* **12**, No. 60; 1935-6.

YOUNG, J. Z. En *Evolution,* editado por G. R. de Beer. Oxford, 1938.

Indice analítico

(Las cifras remiten a las páginas; cuando están impresas **en negrita** indican que allí se define la expresión correspondiente).

Acecho, 144.
Acotado (a), 65.
Activo (a), **200**.
Actividad, 17.
Acumulación, 109.
Adaptación, 77.
— en serie, 235.
— tiempo de, 175.
Adaptativo, comportamiento, 77.
Adiestramiento, amaestramiento *o* doma, 16, 134.
Aislamiento, 50, 195.
Aleatorio (a).
— construcción, 119, 202.
— sistema, 177.
Algebra de máquinas, 280.
Alternantes, medios, 139.
Ameboides, procesos, 150.
Amoníaco, 98.
Amplificación, 273.
Anémona de mar, 191, 233.
Aplicación *o* correspondencia, **280**, **304**.
Aprendido, comportamiento, 14.
Aprendizaje, 24, 272.
— instrumental, 137.
Arquímedes, 85.
Autocorrección, 73.
Automático, piloto, 131.
Axiomas, 21, 28.

Bartlett, F.C., 53.
Bourbaki, N., 279.
Boyd, D. A., 143.
Búsqueda de la meta, 72, 102, 157.

Caco, 181.
Cambio, 27.
Campo, 38.
— estable, **66**.
Cannon, W. B., 77, 84, 123.
Caracol, 223.
Carey, E. J., 151.
Carrera, 50.
Castigo, 134, 139.
Cazador, 144.
Cebo, 167.
Cerradura de combinaciones, 181, 242.
Ciclo, **66**.
Circo, 15.
Círculo vicioso, 71.
Civilización, 81.
Complejo, sistema, 43, 48, 175, 227.
Comportamiento adaptativo, **77**.
— aprendido, 14.
— línea de, **35**.
— reflejo, 14.
Composición externa, 280.
Comunicación, 255.
Conciencia, 23.
Condicionada, respuesta, 15, 30, 137.
Conexión, 185.
Configuración de genes, 20, 160.
Confluencia, **218**.
Conjunto o totalidad de un sistema, 61, 184.
Conmutación, 196.
Conmutador de escalones, 126.
Conocimientos "recogidos", 33.
Constancia, 194.
Construcción aleatoria, 119, 202.
Coordenadas, 57.
Coordinación, 75, 86, 126.
Cowles, J. T., 237.
Cristalización, 180.
Crítico (a),
— estado, **113**, **315**.
— superficie, **315**.
Cuerdas vocales, 257.
Culler, E., 95.
Cultivo tisular, 150.
Curare, 95.

Chimeneas, 212.

Dancoff, S. M., 155.
Dependencia, **189**.
Desacostumbrado, 141.
Determinación, 22, 116.
Determinado por estados, **40**.
Diabetes, 94.
Diagrama de efectos inmediatos, **69**, 147, 320.
— últimos, **193**, 320.
Diccionario, 275.
Dilación, 145.
Dirección por los errores, 73.
Discontinuidad, 144.
Discriminador de entrada, mecanismo, 171, 253.

Dispersión, **209**.
Dolor, 58, 134.
Dominación, **190**.
Duración de las pruebas, 145.

Ecuación característica, **295**.
Ecuaciones simultáneas, 242.
Eddington, A. S., 29.
Efectividad, 191.
Efectos, 67.
— inmediatos, **69**, 320.
— últimos, 320.
Elásticos, 110, 313.
Endroma, 150.
Energía, 188.
Enlace, 97, **307**.
Ensayo y error, 104.
Equilibrio, estado de, **63**, **294**.
— índice de, 205.
— indiferente, 61.
— inestable, 61.
Equivalencia, relación de, 280.
Errores, dirección mediante los, 73.
Escalón, mecanismo de, 113, 149.
Escalonada, función, 96, **109**, **313**.
Escalones, conmutador de, 126.
Escape, 71.
Esgrima, 87.
Espacio de fases, 36.
Estabilidad, 61, 293.
— normal, **294**.
Estable, campo, **66**.
— región, **66**.
— sistema, **66**.
Estado, **30**, **281**.
— crítico, **113**, **315**.
— de equilibrio, **63**, **294**.
— estacionario, 61.
— inicial, **35**.
Estímulo, 95.
— impulsor, **96**.
Estrategia, 43.
Exponencial, función, 177.

Fallo, 142.
Fichas, 237.
Forma, 184.
Fuego de chimenea, 25.
Función escalonada, 96, **109**, **313**.
— exponencial, 177.
— nula, **109**.
— parcial, **109**.
— total, **109**.
Fusible, 110.

Girden, E., 95.
Golondrina, 31.
Grant, W. T., 87.
Grindley, G. C., 136.
Grupo, 282.

Habituación, 218.
Halcón, 236.
Harrison, R. G., 150.
Hertz, Heinrich, 69, 106.
Hilgard, E. R., 137, 254.
Holmes, S. J., 85, 86.
Homeóstasis, 77.
"Homeostático", **123**.
Homeóstato, 123, 285.
Humphrey, G., 223.
Hurwitz, A., 296.

I. to C., 11.
Impares y pares, 270.
Impulsor, estímulo, **96**.
Inactivo (a), **200**.
Inalámbrica (transmisión), 69.
Independencia, **188**, **319**.
Indice de equilibrio, 205.
Indiferente, equilibrio, 61.
Inestable, equilibrio, 61.
Inhibición retroactiva, 168, 251.
Insensibilidad al dolor, 143.
Interferencia, 254.
Interruptor, 110.
Introducción a la cibernética, 11.
Invariantes, 280.
Iterados, sistemas, **232**.

Jennings, H. S., 53, 222, 228.

Laberintos, 15.
Laplace, 43.
Lashley, K. S., 213.
Lectura de una escala, 29.
Levi, G., 150.
Ley de división, 280.
Línea de comportamiento, **35**, **281**.
Lineal, sistema, **285**.
Líneas de Fraunhofer, 149.
Localización, 149, 211.
Loeb, J., 152.
Lógica de mecanismo, 279.
Longitud de trayectoria, 177.
Lorente de Nó, R., 149.
Lucio, 135.

Mando, 188.
Máquina, **13**.
— con entrada, **40**.

Maquinista, 18.
Marina, A., 128.
Marquis, D. G., 137, 254.
Masticación, 19.
McCulloch, W. S., 150.
McDougall, W., 84.
Mecanismo de escalón, 113, 149.
— discriminador de entrada, 171, 253.
Medio, **51**.
Medios alternantes, 139.
Memoria, 22.
Método operativo, 22, 31.
Micción, 113.
Microscopio, 15.
Miniaturización, 153.
Montar en bicicleta, 24, 51.
Morgan, C. Lloyd, 54, 236.
Mowrer, O. H., 132.
Müller, G. E., 253.
Multiestable, sistema, ***246***.
Músculos oculares, 128.

Natural, selección, 21, 160.
— sistema, 39.
Neurona, 17.
Nie, L. W., 143.
"No tirar", 212.
Número cardinal, 47.
— de partes, 175.
Nyquist, H., 297.

Objetividad, 21.
Objetivo *o* meta, **157**.
Observación, 31.
Operación primaria, ***32***, ***281***.
Operativo, método, 22, 31.
Optimo (tipo), 261.
Organos de los sentidos, 210.
Osciloscopio, 243.

Paloma, 22.
Paramecio, 222, 228.
Parámetro, **91**, 303.
Parcial, función, **109**.
Pares e impares, 270.
Parker, G., 191, 233.
Parte y todo, 18, 99.
Patentizar, 24.
Patitos, 54.
Pauling, L., 153.
Pavesas, 204.
Pávlov, I. P., 30, 84, 136, 137, 213.
Péndulo, 29, 41, 72, 91.
Percatarse, 24.
Perturbación, 156, 165.
Piloto automático, 131.
Pilzecker, A., 253.
Placa terminal, 151.
Poliestable, sistema, ***203***.
Premio, 134.
Principio de interferencia, 254.
Probabilidad de la estabilidad, 299.
Problema tipo, 24, 81, 101.
Procesos ameboides, 150.
Pruebas de inteligencia, 145.
Punto representativo, ***37***.

Radio, 70.
Reacción, 71.
Realimentación *o* retroacción, 53, 265.
— de segundo orden, 105.
Reacción *o* regimiento, 257.
Reciprocidad de las conexiones, 149.
Referencias bibliográficas, 323.
Reflejo, comportamiento, 14.
Reflexólogos, 184.
Regulaciones auxiliares, 255, ***267***.
Regulador, 61, 65, 67.
— auxiliar, 255.
— sistema, ***282***.
Relación de equivalencia, 280.
Relevador, 111, 154.
Reloj, 28.
Reorganización, 131.
Representación canónica, ***283***.
Representativo, punto, ***37***.
Resolución de ecuaciones, 242.
Respuesta condicionada, 15, 30, 137.
Resultado, 165.
Robinson, E. S., 254.
Romperse, 114, 314.
Rubin, H., 177.
Ruido, 312.

Sacar (en un juego), 257.
Selección de equilibrios, 219, 269.
— natural, 21, 160.
— y veto, 100.
Señal, 18.
Servomecanismo, 70.
Shannon, C. E., 267, 312.
Serrington, C. S., 184.
Sistema, **30**, ***281***.
— aleatorio, 177.
— complejo, 43, 48, 175, 227.
— estable, **66**.
— iterado, ***232***.
— lineal, ***285***.
— multiestable, ***246***.
— natural, 39.

Sistema, poliestable, **203**.
— regular, **282**.
— ultraestable, 101, **120**, 317.
Sitgreaves, 177.
Situaciones recurrentes, 165.
Skaggs, E. B., 254.
Skinner, B. F., 22.
Sommerhoff, G., 89.
Speidel, C. C., 151.
Sperry, R. W., 128.
Starling, E. H., 53, 84.
Subjetivo, 23.
Submeta, 103, 264.
Sujeción *o* ligadura, 166.
Superficie crítica, **315**.
Supervivencia, 21, **58**, 85, 270.

Tabes dorsalis, 54.
Teleología, 21, 72, 157.
Temple, G., 43.
Tenis, 257.
Teoría de conjuntos, 279.
Termostato, **61**.
Tiempo, **30**.
Tiritera, 78.
Todo *o* nada, 110.
Topología, 279.
Tormenta, 31.
Tos, 14.
Transductor, 312.
Transformación, 288.
Transición, **32**, **281**.

Ultraestable, sistema, 101, **120**, 317.
Umbral, 198.
Uniselector, 126.

Variable, **28**, 45, 91, **281**.
— esencial, **58**.
— principal, **115**, **306**.
Variedad necesaria, 267.
Vejiga de la orina, 113.
Veneno, 143, 167.
Veto, 100, 107.
Vías anatómicas, 255.

Watt, regulador de, 61, 65, 67.
Wolfe, J. B., 237.

Young, J. Z., 149.

parar la segunda (de la que es versión esta edición castellana), ha refundido toda la obra y, en particular, ha redactado de nuevo sus dos terceras partes finales.

* * *

El profesor William Ross Ashby, M. A., M. D., B Ch., M. R. C. S., L. R. C. P. y D. P. M., nació en 1904 y se graduó en el Sidney Sussex College, de Cambridge (Inglaterra). Tras recibir el título de Doctor en Medicina se dedicó durante quince años al estudio científica del cerebro humano, en especial de su funcionamiento en los enfermos y deficientes mentales, y después de la Segunda Guerra Mundial continuó estos estudios como Director de investigaciones del hospital psiquiátrico Barnwood House, en Gloucester (Inglaterra). Desde finales de 1960 se encuentra en los Estados Unidos; allí enseña e investiga actualmente en la Sección de ingeniería eléctrica de la Universidad de Illinois, en Urbana.

Ha escrito numerosos trabajos en revistas científicas y en volúmenes colectivos de neurofisiología, y además de la presente obra ha publicado el libro *An Introduction to Cybernetics* (1958), del cual existen versiones en castellano, checo, francés, polaco y ruso.